

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»  
Інженерно-фізичний факультет  
Кафедри фізики металів**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»  
В.о. завідувача кафедри  
\_\_\_\_\_ Іващенко Є.В.  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра  
зі спеціальності 132 Матеріалознавство**

**на тему: «Вплив напруженого стану на процеси впорядкування у  
нанорозмірних плівкових композиціях [Pt/Fe]<sub>4</sub> на підкладках SiO<sub>2</sub>/Si(001) та  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(10 $\bar{1}$ 0)»**

Виконав: студент VI курсу, групи Фм-71мп

Стаднічук Богдан Валентинович

Керівник: н.с., к.т.н. Вербицька Т.І.

Консультант з охорони праці та безпеки  
у надзвичайних ситуаціях:

професор, д.т.н., Левченко О.Г.

Консультант із розробки стартап проекту:

доцент, к.е.н., Глущенко Я.І.

Консультант із питань нормоконтролю:

асистент КФМ, Шаповалова Н.А.

Рецензент: к.т.н. Аршук М.В.

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних посилань.  
Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Інженерно-фізичний факультет**  
**Кафедри фізики металів**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 132 Матеріалознавство (Металофізичні процеси та їх комп'ютерне моделювання)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Є.В. Іващенко

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**  
**Стаднічуку Богдану Валентиновичу**

1. Тема дисертації **«Вплив напруженого стану на процеси впорядкування у нанорозмірних плівкових композиціях [Pt/Fe]<sub>4</sub> на підкладках SiO<sub>2</sub>/Si(001) та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(10 $\bar{1}$ 0)»**, науковий керівник дисертації Вербицька Тетяна Іванівна, затверджені наказом по університету від « 9 » листопада 2018 р. № 4127-с

2. Термін подання студентом дисертації \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження – термічно активовані процеси фазоутворення в нанорозмірних плівкових композиціях [Pt/Fe]<sub>4</sub> на підкладках SiO<sub>2</sub>/Si(001) та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[10 $\bar{1}$ 0], їх структура та властивості.

4. Вихідні дані: нанорозмірні плівкові композиції [Pt/Fe]<sub>4</sub> на підкладках SiO<sub>2</sub>/Si(001) та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(10 $\bar{1}$ 0).

5. Перелік завдань, які потрібно розробити :

а) встановити доцільність промислового використання нанорозмірних плівкових композицій на основі FePt в якості магнітних накопичувачів та ознайомитися з існуючими розробками та дослідженнями в даній галузі;

б) встановити вплив термічної обробки на фазоутворення в багатошарових нанорозмірних плівкових композиціях [Pt(4,2 нм)/Fe(3,2 нм)]<sub>4</sub> після їх осадження та термічної обробки в атмосфері нітрогену.

в) встановити типу підкладки на формування фазового складу та структури у багатошарових плівкових композиціях після швидкого термічного відпалу в атмосфері нітрогену.

6.Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу титульна (1 слайд), вступ (2-6 слайди), об'єкти та методи дослідження (7, 8 слайди), результати (9-16), висновки (17 слайд)

7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Консультанти розділів дисертації\*

| Розділ  | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|---|---|----------------|------------------|
|   |   | завдання видав | завдання прийняв |
| Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях | Левченко О.Г., професор, д.т.н.           |                |                  |
| Розробка стартап - проекту                        | Глущенко Я.І., доцент, к.е.н.             |                |                  |

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації                              | Термін виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|-------|--|--|----------|
| 1     | Огляд джерел та написання літогляду  |  |          |
| 2     | Нанесення плівкових композицій $[Pt/Fe]_4$ на підкладки $SiO_2$ та $Al_2O_3$ |  |          |
| 3     | Проведення швидкого відпалу в атмосфері азоту                                |  |          |
| 4     | Рентгеноструктурні дослідження   |  |          |
| 5     | Оцінка магнітних властивостей плівкових композицій                           |  |          |
| 6     | Оцінка морфології поверхні плівкових композицій                              |  |          |
| 7     | Аналіз результатів та написання диплому                                      |  |          |
| 8.    | Захист   |  |          |

Студент

Б.В. Стаднічук

Науковий керівник дисертації

н.с, к.т.н. Т.І. Вербицька

\_\_\_\_\_

## РЕФЕРАТ

**Магістерська дисертація:** 93 сторінки, 46 рисунків, 9 таблиць, 51 літературне джерело.

НАНОРОЗМІРНІ ПЛІВКОВІ КОМПОЗИЦІЇ, FePt, АТМОСФЕРА  
НІТРОГЕНУ, ШВИДКИЙ ТЕРМІЧНИЙ ВІДПАЛ, КОЕРЦИТИВНА СИЛА

**Актуальність теми:** дослідження впливу напруженого стану у плівкових композиціях  $[\text{Pt/Fe}]_4$  на підкладках  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3[10\bar{1}0]$  має практичне значення для розробки нових матеріалів, перспективних у якості носіїв надщільного магнітного запису.

**Мета роботи:** дослідження формування фазового складу та структури в нанорозмірних плівкових композиціях  $[\text{Pt/Fe}]_4$  на підкладках  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3[10\bar{1}0]$  при швидкому термічному відпалі в атмосфері азоту.

**Об'єкт дослідження:** термічно активовані процеси фазоутворення в нанорозмірних плівкових композиціях  $[\text{Pt/Fe}]_4$  на підкладках  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3[10\bar{1}0]$ .

**Предмет дослідження:** фазовий склад, структура та магнітні властивості нанорозмірних плівок  $[\text{Pt/Fe}]_4$ .

**Методи дослідження:** рентгеноструктурний фазовий аналіз (Rigaku Ultima IV), атомно силова мікроскопія, SQUID - магнітометрія.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що:

1. Визначено вплив типу підкладок ( $\text{SiO}_2/\text{Si}$ , сапфір) на структуру та процеси фазоутворення в багатошарових плівкових композиціях  $[\text{Pt/Fe}]_4$ .

2. Встановлено, що в процесі швидкого термічного відпалу в атмосфері  $\text{N}_2$  за температур відпалу  $500\text{ }^\circ\text{C} - 700\text{ }^\circ\text{C}$  в багатошаровій плівковій композиції  $[\text{Pt/Fe}]_4$  на  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  формується більша кількість впорядкованої фази  $L1_0\text{-FePt}$  з орієнтацією зерен в напрямку  $[001]$  перпендикулярно площині плівки з кращими магнітними властивостями.

## ABSTRACT

**Master thesis:** 93 shifts, 46 pictures, 7 tables, 51 literature sources

NANOSCALE FILM COMPOSITIONS, FePt, NITROGEN ATMOSPHERE,  
RAPID THERMAL ANNEALING, COERCIVITY

**Relevance of the topic:** the investigation of the influence of the stress state in  $[\text{Pt/Fe}]_4$  film compositions on the  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3(10\bar{1}0)$  substrates has practical mean for developing new materials promising as magnetic recording media with high density.

**The aim of this work** is investigation of phase composition and structure formation in nanoscale  $[\text{Pt/Fe}]_4$  film compositions on  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3(10\bar{1}0)$  substrates under rapid thermal annealing in nitrogen atmosphere.

**The object of the study** is thermally activated phase formation and structure processes as well as magnetic properties in nanosized  $[\text{Pt/Fe}]_4$  film compositions on the  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3(10\bar{1}0)$  substrates.

**Methods:** X-ray diffraction phase analysis (Rigaku Ultima IV), atomic force microscopy, SQUID magnetometry.

**Scientific novelty** implies that:

1. The influence of substrate type on the structure and phase formation processes in multilayer  $[\text{Pt/Fe}]_4$  film compositions was found.
2. It is established that during RTA processes in  $\text{N}_2$  in temperature range of 500 °C – 700 °C the bigger amount of ordered  $\text{L1}_0\text{-FePt}$  phase with orientation of grains in  $[001]$  direction that perpendicular to film plane with enhanced magnetic properties.

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....   | 9  |
| ВСТУП.....   | 10 |
| 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД .....   | 13 |
| 1.1 Розвиток технологій магнітного запису .....  | 13 |
| 1.1.1 Технологія повздовжнього магнітного запису .....   | 15 |
| 1.1.2 Технологія перпендикулярного магнітного запису .....   | 16 |
| 1.1.3 Технологія термічно активованого магнітного запису.....  | 17 |
| 1.2 Зміна властивостей магнітних матеріалів з розміром .....   | 19 |
| 1.3 Діаграма фазового стану Fe-Pt .....  | 23 |
| 1.4 Використання плівок FePt в якості середовища магнітного запису.....  | 24 |
| 1.5 Вплив напруженого стану на фазовий перехід $A1 \rightarrow Ll_0$ -FePt .....   | 28 |
| 1.6 Висновки до розділу 1 .....  | 30 |
| 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА.....   | 32 |
| 2.1 Вибір композицій для дослідження .....   | 32 |
| 2.2 Магнетронне осадження плівкових композицій .....   | 32 |
| 2.3 Методи дослідження структури, фазового складу та магнітних<br>властивостей плівок Fe-Pt .....  | 35 |
| 2.3.1 Рентгеноструктурний фазовий аналіз .....   | 35 |
| 2.3.2 Атомно-силова мікроскопія.....   | 38 |
| 2.3.3 SQUID - магнітометрія .....  | 40 |
| 2.3.4 Розрахунок термічних напружень .....   | 41 |
| 2.4 Висновки до розділу 2 .....  | 42 |
| 3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ .....  | 43 |
| 3.1 Вплив швидкого термічного відпалу у нітрогені на формування<br>фазового складу і магнітні властивості багат шарової нанорозмірної<br>плівкової композиції $[Pt/Fe]_4$ на підкладці $Al_2O_3[10\bar{1}0]$ ..... | 43 |

|  |    |
|--|----|
| 3.1.1 Формування фазового складу нанорозмірної плівкової композиції [Pt/Fe] <sub>4</sub> на підкладці Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [10 $\bar{1}$ 0] при відпалі у нітрогені .....                            | 43 |
| 3.1.2 Магнітні властивості плівкової композиції [Fe/Pt] <sub>4</sub> на підкладці Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [10 $\bar{1}$ 0] після відпалу у нітрогені .....  | 50 |
| 3.1.3 Морфологія поверхні плівкових композицій [Pt/Fe] <sub>4</sub> на підкладці на підкладці SiO <sub>2</sub> (100 нм)/Si(001) після відпалів в атмосфері нітрогені .....                                     | 52 |
| 3.2 Структура та магнітні властивості багатошарової нанорозмірної плівкової композиції [Pt/Fe] <sub>4</sub> на підкладці SiO <sub>2</sub> (100 нм)/Si(001) після швидкого термічного відпалу у нітрогені ..... | 54 |
| 3.2.1 Формування фазового складу та структури нанорозмірної плівкової композиції [Pt/Fe] <sub>4</sub> на підкладці SiO <sub>2</sub> (100 нм)/Si(001) при відпалі .....   | 54 |
| 3.2.2 Магнітні властивості плівкових композицій [Fe/Pt] <sub>4</sub> на підкладці SiO <sub>2</sub> /Si(001) після швидкого відпалу у нітрогені .....   | 59 |
| 3.2.3 Морфологія поверхні плівкових композицій [Fe/Pt] <sub>4</sub> на підкладці SiO <sub>2</sub> (100 нм)/Si(001) при швидкому термічному відпалі у нітрогені .....   | 61 |
| 3.3 Вплив типу підкладки на термічні напруження та залишкові деформації .....  | 62 |
| 3.4 Висновки до розділу 3 .....  | 63 |
| 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ .....  | 65 |
| 4.1 Аналіз параметрів приміщення та мікроклімату в приміщенні .....  | 65 |
| 4.2 Аналіз освітлення приміщення лабораторії .....   | 67 |
| 4.3 Виробничі приміщення .....   | 68 |
| 4.3.1 Випромінювання від рентгенівського дифрактометра .....   | 68 |
| 4.3.2 Випромінювання від ЕОМ .....   | 69 |
| 4.4 Виявлення і аналіз наявності шуму, вібрації, інфра - та ультразвуку .....  | 70 |
| 4.5 Електричний струм .....  | 71 |
| 4.6 Забезпечення безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям .....   | 72 |
| 4.6.1 Пожежна безпека .....  | 72 |
| 4.6.2 Безпека в аварійних ситуаціях .....  | 74 |
| 4.7 Висновок до розділу 4 .....  | 75 |

|   |    |
|---|----|
| 5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ .....                       | 76 |
| 5.1 Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології) ..... | 76 |
| 5.2 Висновки до розділу 5 .....                           | 84 |
| ВИСНОВКИ .....  | 85 |
| CONCLUSIONS .....   | 87 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....                      | 89 |



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

НПК – нанорозмірна плівкова композиція;  
ГЦК – гранецентрована кубічна гратка;  
ГЦТ,  $L1_0$  – гранецентрована тетрагональна гратка;  
 $H_C$  – коерцитивна сила;  
АСМ – атомно-силова мікроскопія;  
ВУП – вакуумний універсальний пост;  
RTA – швидкий термічний відпал;  
SQUID – надпровідний квантовий інтерференційний магнітометр;  
ТАМЗ – термічно активований магнітний запис;  
 $T_C$  – температура Кюрі;  
 $K_u$  – стала енергії магнітно-кристалічної анізотропії;  
ПМА – перпендикулярна магнітна анізотропія;  
 $a, c$  – параметри кристалічної решітки;  
 $K_u$  – магнітокристалічна анізотропія;  
 $T_e$  – температура відпалу.

## ВСТУП

Сьогодні людина не може уявити свого життя без інформаційно-комп'ютерних технологій, які напряду, або ж дотично, пов'язані майже з усіма аспектами нашого життя. Можна виділити характеристику науково технічного прогресу яка є пріоритетною на даному етапі, а саме об'єм пристроїв пам'яті сучасної техніки. Саме тому актуальним завданням є створення жорстких дисків з надвеликою щільністю запису і зберігання інформації.

Факторами, які впливають на напружений стан плівок при осадженні можуть бути товщина, кількість шарів плівкової композиції, взаємне розташування шарів, а також різні умови відпалу, такі як газове середовище (вакуум, азот, водень), швидкості нагрівання і охолодження. Але загальні закономірності та механізми впливу механічних напружень на процеси дифузійного формування структури, фазового складу та магнітних властивостей тонких плівок на основі FePt на сьогодні не можна вважати встановленими повною мірою. Залишаються нерозв'язаними матеріалознавчі задачі по застосуванню механічних напружень, що виникають при осадженні у плівках та подальших відпалах, для зниження температури утворення фази  $L1_0$ -FePt, зменшення розмірів зерен з мінімальною шорсткістю та їх термічної стабілізації, формування текстур, при яких відбувається орієнтація вісі  $c$  легкого намагнічування у перпендикулярному або паралельному напрямку до площини плівки, а також збільшення коерцитивної сили  $H_c$ . Це необхідно для промислового впровадження нанорозмірних плівок на основі FePt як середовища для термічно стабільного магнітного запису і збереження інформації підвищеної щільності.

Саме тому актуальним є використання принципово нових нанорозмірних плівок феромагнетиків з високими магнітними характеристиками, такими як: коерцитивна сила, магнітокристалічна анізотропія, намагнічування насичення. Це може повисити щільність магнітного запису до фізично максимальних

значень. Одним з найбільш перспективних матеріалів є плівкові композиції на основі металів  $[\text{FePt}]_4$ .

Проте, за кімнатної температури, при осадженні цих плівок, на підкладинки в їх структурі формується магнітно-м'яка фаза  $A_1\text{-FePt}$ , яка має гранецентровану кубічну ґратку і довільне розміщення атомів Fe та Pt у її вузлах. Цей фактор перешкоджає використанню даних матеріалів у якості носія надщільного магнітного запису. Щоб сформувати магнітно-тверду хімічно впорядковану фазу FePt необхідно провести термічну обробку, що спричинить до, росту зерен і поверхневої шорсткості плівок і, як наслідок, зниження щільності запису та проблемності практичного використання даних матеріалів. Виходячи з цього, одним з актуальних завдань сучасного матеріалознавства є отримання магнітно-стабільних дрібнодисперсних зерен фази FePt при відпалах за якомога нижчих температур та дослідження впливу напруженого стану.

Для вирішення даної задачі необхідно провести дослідження термічної обробки  $[\text{FePt}]_4$  при різних фізико-технологічних параметрах (склад атмосфери, тривалість відпалу, температура). Також необхідно звернути увагу на контроль товщини шарів плівкових композицій.

Доцільно провести дослідження впливу напруженого стану на формування фазового складу нанорозмірних плівкових композицій з шарами Fe/Pt. Оскільки поверхнева енергія на границях поділу між шарами може слугувати додатковою рушійною силою для перебігу дифузійних процесів. Змінюючи кількість шарів і їх товщину можна отримувати плівкові матеріали із заздалегідь відомими магнітними та структурними параметрами.

В роботі досліджено вплив відпалу в атмосфері азоту та швидкого термічного відпалу на фазовий склад та магнітні властивості нанорозмірних плівкових композицій  $[\text{Pt}(4,2 \text{ нм})/\text{Fe}(3,2 \text{ нм})]_4$  на підкладках термічно окисненого  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3[10\bar{1}0]$  після швидкого термічного відпалу в атмосфері азоту тривалістю 30 секунд.

Метою даної роботи є дослідження формування фазового складу та структури в нанорозмірних плівкових композиціях  $[\text{Pt/Fe}]_4$  на підкладках  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3(10\bar{1}0)$  при швидкому термічному відпалі в атмосфері азоту

Для досягнення поставленої мети було поставлено наступні задачі:

- провести дослідження літературних джерел з питань розробки та застосування тонких плівок в якості носіїв магнітного запису;
- визначити комплекс методів дослідження структури та властивостей матеріалів;
- дослідити зміну фазового складу, напруженого стану та магнітні властивості у нанорозмірних плівкових композиціях  $[\text{Pt/Fe}]_4$  на підкладках  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  та  $\text{Al}_2\text{O}_3[10\bar{1}0]$ ;
- зробити висновки по роботі.

# 1 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

## 1.1 Розвиток технологій магнітного запису

Розмір, доступність, продуктивність і, звичайно, ємність, усі ці параметри жорстких накопичувачів зазнали істотного прогресу з моменту створення компанією IBM першого комерційного накопичувача RAMAC у 1956 році, у якого щільність запису була усього 2 Кбіт/дюйм<sup>2</sup>. Згідно з законом Мура збільшення щільності магнітного запису відбувається експоненціально та подвоюється кожні півтора роки (рис.1.1). Цей емпіричний закон виконується впродовж десятиріч, але для його підтримання необхідна розробка новітніх технологій і матеріалів [1].

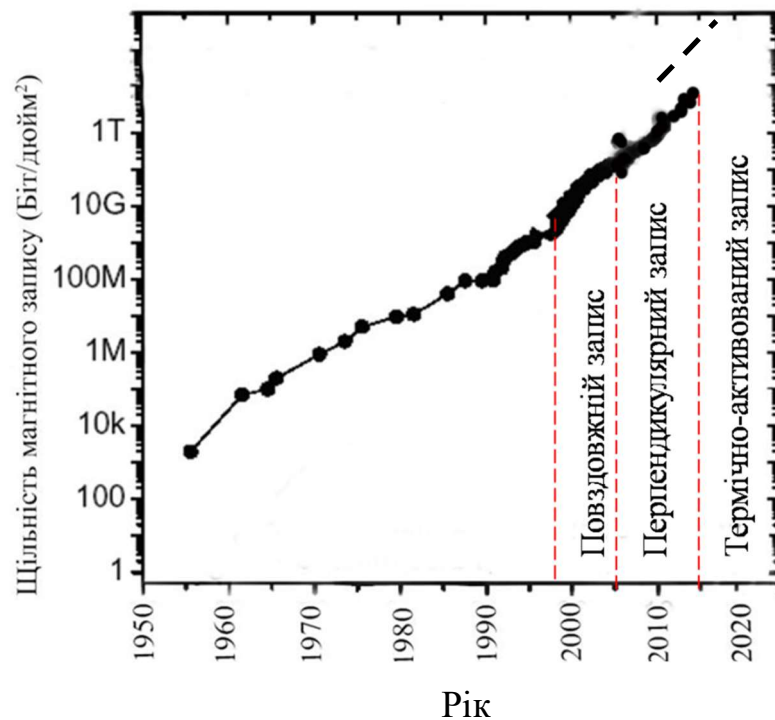


Рисунок 1.1 – Закон Мура, застосований до магнітних накопичувачів [1]

Магнітний запис базується на феромагнітних властивостях речовин, що здатні зберігати намагнічений стан за відсутності зовнішнього магнітного поля. Щоб запобігти самовільному розмагнічуванню матеріали повинні мати достатньо високу енергію кристалічної магнітної анізотропії порівняно з енергією термічних флуктуацій:

$$E = K_u V \gg K_B T, \quad (1.1)$$

де  $K_u$  – енергія одновісної кристалічної магнітної анізотропії;

$V$  – об'єм магнітного зерна;

$K_B$  – стала Больцмана;

$T$  – абсолютна температура.

Для досягнення збільшення щільності магнітного запису необхідним є зменшення середнього розміру зерен матеріалу [2, 3]. Однак це призводить до зменшення об'єму зерна і, як наслідок, до зменшення добутку  $K_u V$  при сталій енергії анізотропії. При малих значеннях енергетичного бар'єру носій може зазнавати термічної нестабільності через теплову енергію коливання атомів ( $K_B T$ ). Явище самовільної зміни намагніченості носія без прикладення зовнішнього магнітного поля називається суперпарамагнітним ефектом. Суперпарамагнітний ефект став серйозною перешкодою для підтримання тенденції збільшення щільності магнітного запису інформації.

Найбільш розповсюдженою, до 2005 року, була технологія повздовжнього магнітного запису, в даний час домінуючою є технологія перпендикулярного запису, а майбутній розвиток даної галузі вчені пов'язують з технологією термічно активованого запису [4].

### 1.1.1 Технологія повздовжнього магнітного запису

Магнітний шар, який має доменну структуру, слугує середовищем для запису даних на диск. На котушку головки подається змінний електричний струм, відносно неї рухається робоча поверхня диску. На цьому і базується принцип запису інформації на жорсткий диск, так як формується змінне мігнітне поле, що діє на феромагнетик і в залежності від сигналу задає напрям вектора намагніченості доменів. При зчитуванні переміщення доменів біля зазору голівки призводить до зміни магнітного потоку в магнітопроводі голівки, що в свою чергу призводить до виникнення змінного електричного сигналу в котушці за рахунок електромагнітної індукції [5].

Промисловість дискових накопичувачів, упродовж майже 50 років, базувалася на методі повздовжнього магнітного запису.

Дана технологія полягає в орієнтації магнітних доменів в тонкоплівковому шарі паралельно до площини носія (рис. 1.2). Для покращення орієнтації осей легкого намагнічування можуть використовуватися додаткові нижні або проміжні шари. Зерна, орієнтовані в напрямку (110) будуть мати осі легкого намагнічування паралельні до поверхні магнітного шару. Бажану орієнтацію отримують використовуючи проміжні шари з близькими до магнітного матеріалу значеннями параметрів кристалічної ґратки. Орієнтація осі легкого намагнічування буде тим кращою, чим меншою буде різниця в періодах.

В окрему комірку, яка містить декілька десятків доменів (70-100), записується один біт інформації. Біт як мінімальна одиниця кількості інформації, може бути рівним одному з двох значень 0 або 1. Якщо напрямок сумарного магнітного моменту такої області співпадає з напрямком руху магнітної голівки – такий стан відповідає логічному «0», а протилежний напрямок – логічний «1».

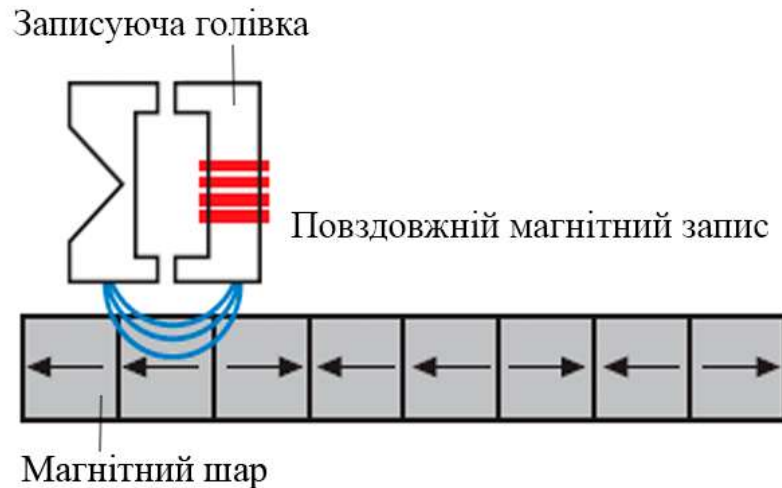


Рисунок 1.2 – Схема повздовжнього магнітного запису інформації на магнітні накопичувачі [6]

Якщо ж сусідні області мають протилежний напрямок магнітних моментів, то домени, дотичні однойменними полюсами, розташовані між ними, відштовхуватимуться один від одного і, прагнучи досягти енергетично стійкого положення, змінять напрямок магнітних моментів непередбачуваним чином. В результаті утвориться зона невизначеності, що зменшує рівень корисного сигналу при зчитуванні. При цьому збільшується рівень шумів.

Щільність запису за допомогою поздовжнього методу має межу 40 Гбіт/см<sup>2</sup> [6].

### 1.1.2 Технологія перпендикулярного магнітного запису

При технології перпендикулярного магнітного запису в магнітному шарі домени орієнтуються перпендикулярно до площини плівкового матеріалу, що дозволяє отримати більші значення щільності магнітного запису в порівнянні з повздовжньою технологією (рис. 1.3). Причина вищої щільності перпендикулярного запису пояснюється не внутрішніми характеристиками окремого домену, а силами взаємодії між сусідніми [5, 7, 8].





Рисунок 1.3 – Схема перпендикулярного запису інформації на магнітні накопичувачі [7]

Перпендикулярне розташування доменів істотно зменшує вплив сил магнітної взаємодії між сусідніми доменами, що впливають на магнітні поля кожної з цих часток при поздовжньому записі.

Перпендикулярний запис вимагає наявності спеціальної додаткової підкладки (магнітно-м'якого шару) під шаром матеріалу запису, а також принципово інших, «двосторонніх», голівок, здатних генерувати сильніше магнітне поле. Щоб забезпечити достатній рівень сигналу, силові лінії магнітного поля повинні, проходячи через реєструючий шар, замикатись на осерді голівки.

За оцінками експертів сучасна технологія перпендикулярного запису має фізичну межу щільності в  $60 \text{ Гбіт/см}^2$ . Таким чином, використання даного типу запису дозволить довести ємність 3,5-дюймових вінчестерів до декількох терабайт [7].

### 1.1.3 Технологія термічно активованого магнітного запису

Термічно активований запис (ТАМЗ), одна з перспективних технологій яка повинна збільшити щільність запису на жорсткі носії інформації.

В основу даного методу покладена залежність магнітних властивостей робочого шару від температури [14, 18, 19]. Запис інформації здійснюється

шляхом прогріву локальної області робочої поверхні, що знаходиться в магнітному полі голівки запису.

Для нагріву використовують лазерний промінь. Магнітне поле підбирають таким чином, щоб без нагріву його напруженість не вистачала для перемагнічування. Схематичне зображення ТАМЗ зображено на рис.1.4. При підвищенні температури зони робочого шару спостерігається зміна його магнітних властивостей – коерцитивна сила при нагріві до температури Кюрі опускається до нуля, після чого ділянка охолоджується. Перемагнічування проводять до того часу поки коерцитивна сила не досягла початкового значення.

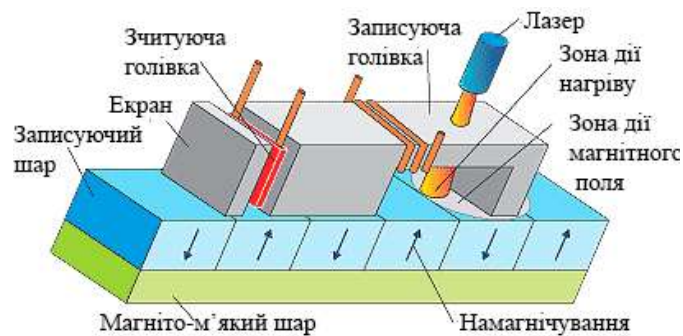


Рисунок 1.4 – Схема термічно активованого магнітного запису [7]

Енергію термічного бар'єру можна розрахувати за формулою:

$$E_B = K_u V \left( 1 - \frac{4\pi M_s}{H_K} \right)^2, \quad (1.2)$$

де  $E_B$  – енергія термічного бар'єру, Дж;

$K_u$  – енергія магнітно-кристалічної анізотропії, Дж/см<sup>3</sup>;

$V$  – об'єм, см<sup>2</sup>;

$M_s$  – намагніченість насичення, А/см;

$H_K$  – коерцитивна сила, Е [13].

Технологія ТАМЗ потребує використання записуючих головок принципово іншої технології. Потенційна густина запису, яку може забезпечити

матеріал оцінюється з міркувань, що термічний енергетичний бар'єр має бути більшим за  $60 \text{ k}_B T$ .

Для термічно активованого магнітного запису використовують матеріали з високою коерцитивною силою, що забезпечує стабільність записаних ділянок.

Діаметром сфокусованого лазерного променя визначаються мінімальні розміри області, що відповідає одному біту інформації.

За оцінками експертів, дана технологія дозволяє збільшити щільність запису, в порівнянні з перпендикулярною технологією, приблизно в десятки разів, тобто її перспективи оцінюються в десять терабіт на квадратний дюйм. Прогнозується, що ТАМЗ дозволить забезпечити стрімке зростання щільності магнітного запису до 2020 року [7].

## **1.2 Зміна властивостей магнітних матеріалів з розміром**

При нагріванні плівок, а також при кімнатній температурі спостерігається зміна їх структурного стану та відбувається укрупнення кристалітів, зменшення мікро- та макронапружень, фазові перетворення. Структура та фізичні властивості плівок в більшій мірі залежать також від товщини плівок. При зменшенні товщини плівки зростає вклад поверхневих процесів в порівнянні з об'ємними. В плівках з товщиною меншою за деяку критичну в результаті збільшення вкладу поверхневої енергії змінюються фазові та структурні стани, електроопір та інші фізичні властивості. Особливості структури та товщина тонких плівок, звичайно, здійснюють істотний вплив на їх магнітні властивості [11]. Магнітні властивості матеріалів залежать від розміру і форми кристалітів, які формують магнітний матеріал. Товщина магнітних плівок порівнюється з рівноважними розмірами магнітних доменів. Мала товщина магнітних плівок перешкоджає виникненню в них при перемагнічуванні значних індукційних струмів (вихрових струмів). Перелічені та інші особливості магнітних плівок

свідчать про відмінності їх фізичних властивостей від властивостей масивних зразків магнітних матеріалів [12]. В металевих магнітних плівках завтовшки  $\sim 0,1$  мкм намагніченість однорідна по товщині і орієнтується в їх площині [13-14].

Як відомо, феромагнетик розбитий на безліч магнітних доменів (рис. 1.5), напрям спонтанної намагніченості в яких змінюється від домену до домену. Рушійною силою розбиття магнітного матеріалу на домени є мінімізація магнітостатистичної енергії – енергії обумовленої магнітним диполь-дипольною взаємодією полюсів, що виникають на поверхні зразка.

При переході від одного домену до сусіднього відбувається зміна напрямку намагніченості. Воно здійснюється не стрибком, а поступово, в межах деякого проміжного шару визначеної ширини. На межі двох доменів спіни поступово змінюють свою орієнтацію від напрямку, паралельного вектору намагніченості першого домену, до напрямку паралельного вектору намагніченості другого. Такий перехідний шар, де змінюється напрям спінів, називається доменною стінкою (рис. 1.5) [14-16].

Залежно від товщини плівок у них зустрічаються різні типи доменних границь. На рис. 1.5 показаний розподіл векторів намагніченості в границях, які спостерігаються в плівках товщиною більше 100 нм та масивних монокристалах, де є антипаралельні домени.

Така модель границі була запропонована Блохом. У блохівській границі відбувається поступовий поворот векторів  $M$  в площинах, паралельних площині доменної границі, поки напрямок намагніченості не зміниться на протилежний. При цьому в доменній границі виникають відмінні від нуля проекції  $M$  на нормаль до площини плівки (рис. 1.5). Стрілки зображають векторні проекції векторів  $M$  на площину, перпендикулярну ВЛН плівки [11, 16]

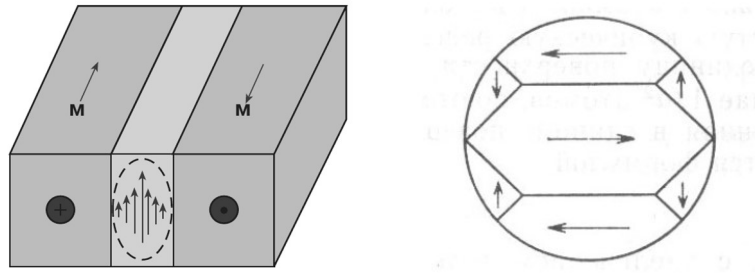


Рисунок 1.5 – Розподілення векторів намагніченості в блохівській доменній границі.

У центральній частині доменної границі вектор  $M$  виявляється спрямованим перпендикулярно до поверхні плівки. У результаті на перетині доменної границі з поверхнею плівки виникають магнітні поля.

Для доменів магнітостатична енергія поверхневих полюсів пропорційна розміру доменів, тому, чим менше цей розмір, тим нижче магнітостатична енергія. Разом з тим при дробленні доменів зростає загальна площа доменних стінок, що приводить до збільшення їх повної енергії. Тому реальний розмір доменів визначається умовою мінімуму суми цих двох енергій. Критичний діаметр однодоменної сферичної частинки для кобальту - 70 нм, нікелю – (30-50) нм, заліза – (15-30) нм.

Плівки можна розглядати як зразки, що володіють двовірною геометрією, тобто малим відношенням товщини плівки  $d$  до її лінійних розмірів. Наприклад, якщо діаметр круглої плівки буде дорівнювати  $D = 1$  мм, а товщина  $d = 100$  нм ( $10^{-4}$  мм), то відношення  $d/D = 10^{-4}$ . При такій геометричній формі зразка енергетично вигідним стає стан плівки, при якому вектори намагніченості при відсутності зовнішнього магнітного поля лежать в площині плівки. Завдяки цьому для намагнічування плівки в її площині необхідно докласти магнітне поле, значення напруженості якого значно менше, ніж для випадку, коли плівка намагнічується по нормалі до її площини. Тобто процес намагнічування тонких плівок суттєво залежить від напрямку, в якому докладено зовнішнє магнітне поле.

Таким чином, специфіка геометричної форми плівок призводить до утворення анізотропії форми. При цьому всі напрямки в площині плівок еквівалентні (плівка володіє площинною магнітною анізотропією). Така особливість плівок відіграє велику роль при їх використанні в якості середовища для поздовжнього магнітного запису до запам'ятовуючих пристроїв. Плівка грає роль робочого шару носія магнітного запису (наприклад, в магнітному диску).

У плівках поряд з анізотропією форми існують і інші види анізотропії, створення яких обумовлено рядом причин. Якщо до плівки в процесі її формування докласти магнітне поле, то в ній виникає одновісна магнітна анізотропія. У площині полікристалічної плівки, наприклад, що має форму круглої плями, стає енергетично вигідною не будь-яка орієнтація векторів намагніченості, а тільки така, при якій намагніченість плівки спрямована вздовж одного переважного напрямлення. Вісь, що збігається з цим напрямком, називається легкою віссю намагнічування (ЛВН). При цьому вектори намагніченості  $M$  можуть орієнтуватися вздовж ЛВН як в одному, так і в протилежному напрямку. Обидва ці напрямки являються однаково стійкими. ЛВН, як правило, збігається з напрямком намагніченості плівки, яке визначається орієнтацією зовнішнього магнітного поля, прикладеного в процесі формування плівки. На анізотропію впливають різні фактори: кристалічна структура плівки, пружні напруження; переважна орієнтація пар атомів певного сорту в сплаві, наприклад, пар атомів заліза в залізо-нікелевому сплаві.

При відхиленні магнітного моменту намагніченої плівки від ЛВН її енергія зростає.

Вісь, перпендикулярна ЛВН ( $\varphi = 90^\circ$ ), називається віссю важкого намагнічування (ВВН). При орієнтації векторів намагніченості вздовж ВВН енергія одновісної анізотропії максимальна [11, 14].

Зміна енергії  $E$  плівки при відхиленні намагніченості від ЛВН:

$$E = VK_u \sin \varphi, \quad (1.3)$$

де  $E$  – енергія анізотропії,

$K_u$  – середнє значення константи анізотропії,

$\varphi$  – кут між напрямком намагніченості і ЛВН,

$V$  – об'єм плівки.

### 1.3 Діаграма фазового стану Fe-Pt

Впорядкування поблизу 50 ат. % Pt, виявлене термічним і мікроскопічним аналізом, було підтверджено вимірюванням твердості, а також магнітними, рентгенівським, резистометричним методом і дилатометричними дослідженнями (рис. 1.6).

Магнітні, дилатометричні і рентгенівські дослідження дозволили виявити ще одну впорядковану фазу на базі сполуки  $\text{Fe}_3\text{Pt}$ . Область її існування лежить в межах (19-33) ат. % Pt, тобто перекриває область  $\alpha \rightarrow \gamma$  та  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворень. Сполука  $\text{Fe}_3\text{Pt}$  – феромагнетик.

Сполука  $\text{FePt}$ , що має ГЦК ґратку, відноситься до структурного типу  $\text{CuAu}$  з параметрами ґратки:  $a = 2,719 \text{ \AA}$ ,  $c = 3,722 \text{ \AA}$ ,  $c/a = 1,369$ . Впорядковані фази  $\text{FePt}$  і  $\text{Fe}_3\text{Pt}$  мають структуру ГЦТ і ГЦК відповідно ( $L1_0$ ,  $L1_2$ ) [8].

Діаграма стану  $\text{FePt}$  відноситься до типу діаграм з відкритою областю  $\gamma$ -фази. На діаграмі можна виділити три зони впорядкованих розчинів:  $\text{Fe}_3\text{Pt}(\gamma_1)$ ,  $\text{FePt}(\gamma_2)$ ,  $\text{FePt}_3(\gamma_3)$ . За даними магнітних, дилатометричних і рентгенівських досліджень встановлена границя фази  $\text{Fe}_3\text{Pt}$ . Область гомогенності  $\text{Fe}_3\text{Pt}$  (19-33) ат. % Pt, що свідчить про існування стабільної області в інтервалі температур  $600^\circ\text{C} - 740^\circ\text{C}$ . Припускається, що між ( $\alpha\text{-Fe}$ ) і  $\text{Fe}_3\text{Pt}$  відбувається евтектоїдна реакція при температурі  $\sim 550^\circ\text{C}$  і вмісті 15 % ат. Pt [26].

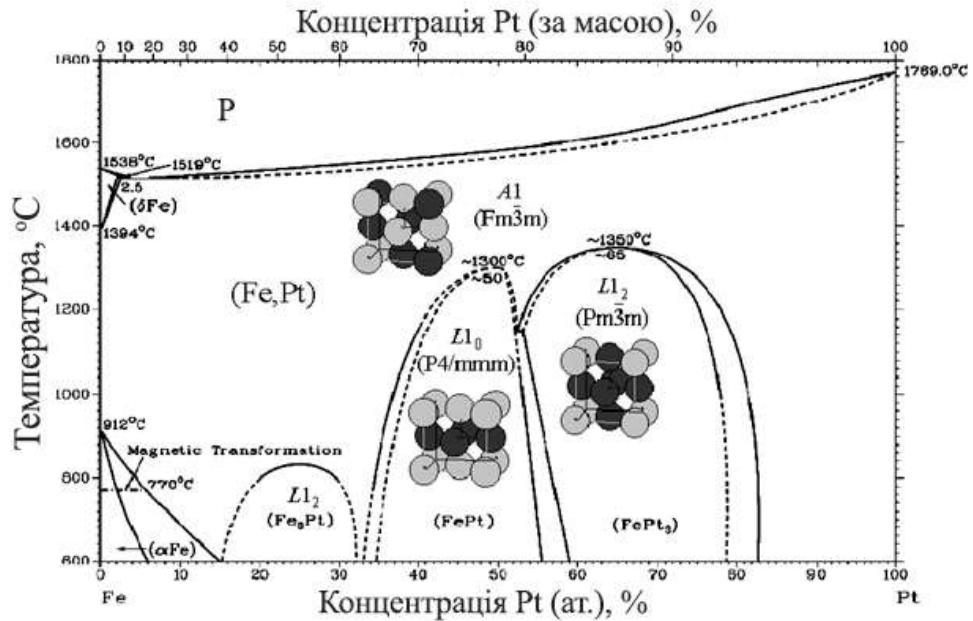


Рисунок 1.6 – Діаграма фазового стану Fe-Pt [8]

Сполука  $\text{Fe}_3\text{Pt}$  – феромагнетик, має ГЦК ґратку та відноситься до структурного типу  $\text{Cu}_3\text{Au}$  з параметрами ґратки:  $a = 2,719 \text{ \AA}$ ,  $c = 3,722 \text{ \AA}$ ,  $c/a = 1,369$ . Впорядковані фази  $\text{FePt}$  і  $\text{Fe}_3\text{Pt}$  мають структуру ГЦТ і ГЦК відповідно ( $L_{10}$ ,  $L_{12}$ ) [27].

Крива точки Кюрі феромагнітної впорядкованої фази  $\text{FePt}$  досягає максимуму приблизно при 50 ат. % і 480 °С.

Перетворення  $(\gamma\text{-Fe, Pt}) \leftrightarrow (\text{FePt}_3)$  відбувається при температурі 1350 °С. В роботі [26] підтверджено, що діаграма стану  $\text{FePt}$  в області існування проміжних фаз  $\text{FePt}$  і  $\text{FePt}_3$  має евтектоїдний характер.

#### 1.4 Використання плівок на основі Fe-Pt в якості середовища магнітного запису

Для подальшого збільшення щільності запису є доцільним досліджувати вплив фізичних, фізико-технологічних параметрів осадження і термічної



обробки на формування кристалічної структури нанорозмірних феромагнітних плівок [13-26, 32].

Високоанізотропні тонкі металеві плівки на основі впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt з гранецентрованою тетрагональною ґраткою (рис. 1.7) є перспективним матеріалом для надщільного запису інформації на магнітні накопичувачі. Так як дана фаза володіє енергією магнітокристалічної анізотропії  $7 \times 10^6$  Дж/м<sup>3</sup> (яка в 1 млн. разів більше, ніж анізотропія чистого заліза) [13-26, 32], високими намагніченістю насичення, температурою Кюрі, коерцитивною силою і корозійною стійкістю.

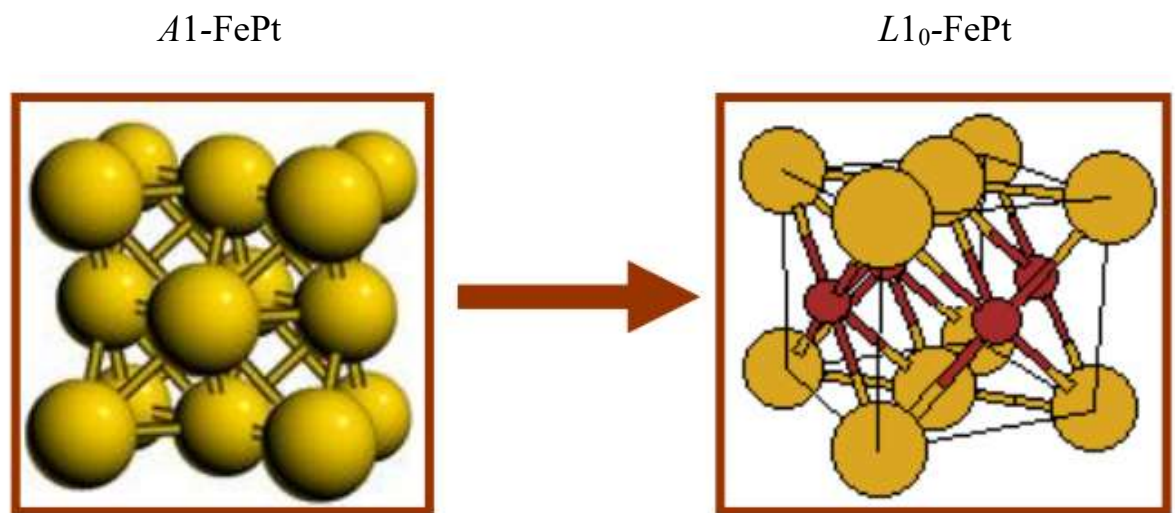


Рисунок 1.7 – Структури хімічно невпорядкованої фази  $A1$ -FePt і хімічно впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt [11]

Розрахунки свідчать, що носій на основі заліза-платини може бути термічно стабільним навіть при розмірах його зерен менших ніж 3 нм. При досягненні таких малих зерен і можливості запису інформації на такий матеріал стає можливість досягнення щільності запису порядку 1 Тб/дюйм<sup>2</sup>. Тому дослідженням магнітних властивостей матеріалів на основі заліза-платини приділяється значна увага науковців.

Проте після осадження на підкладки за кімнатної температури, плівковий матеріал FePt отримує в своїй структурі  $Al$ -FePt - неупорядковану фазу з гранецентрованою кубічною ґраткою (рис. 1.8).

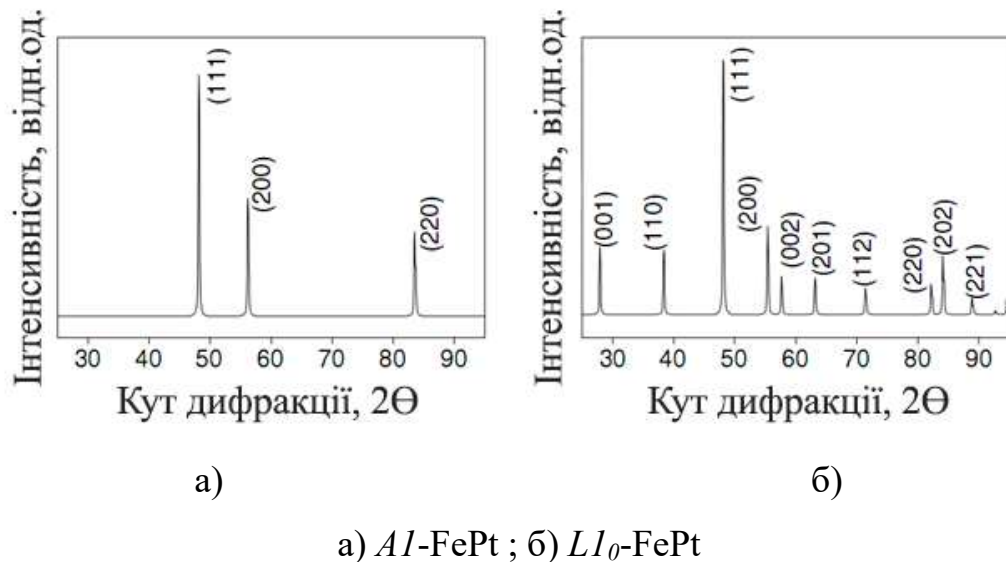


Рисунок 1.8 – Розраховані рентгенівські дифрактограми для хімічно неупорядкованої фази  $Al$ -FePt та повністю впорядкованої фази  $Ll_0$ -FePt [12]

Фаза не має високого значення енергії магнітокристалічної анізотропії. Високоанізотропна впорядкована фаза ж, утворюється лише після високотемпературної термічної обробки. Тобто, термічна обробка є невід’ємною складовою створення носіїв пам’яті заснованих на використанні плівкового матеріалу FePt. Однак високотемпературний відпал, разом з тим, призводить і до росту зерен та поверхневої шорсткості плівкових композицій і не може бути використаний при впровадженні даних матеріалів у промисловість.

Окрім пониження температури фазового перетворення  $Al$ -FePt  $\rightarrow$   $Ll_0$ -FePt для практичного використання магнітних носіїв на основі заліза-платини необхідно вирішити і інші матеріалознавчі задачі – контроль розміру зерен і орієнтації їх вісі легкого намагнічування, формування в плівковому матеріалі вираженої перпендикулярної текстури, збільшення коерцитивної сили. Через те,

що площа (111) фази  $L1_0$ -FePt має найменшу поверхневу енергію, зерна швидше ростуть саме у цій площині. Тому плівки, які осаджуються на аморфні підкладинки зазвичай мають текстуру [111] і не можуть використовуватись для перпендикулярного магнітного запису. Велика кількість досліджень направлена на вирішення цих задач.

Нижче буде розглянуто декілька робіт, які були присвячені дослідженню структури та властивостей нанорозмірних плівкових композицій на основі FePt:

У роботі [23] було розглянуто новий метод вирощування тонких плівок з фазою  $L1_0$ -FePt поверх шарів Pt/Cr на аморфній скляній підкладці. Показано, що хімічно впорядкована фаза  $L1_0$ -FePt утворюється після осадження вже за температури 450 °C завдяки епітаксialьному росту FePt (001) на шарі Pt (001). Однак, епітаксialьний ріст шару Pt (001) можливий лише при наявності підшару Cr (002), який епітаксialьно росте на підкладці [23].

У роботі [24] досліджено властивості подвійних тонких плівкових композицій з магнітно-твердим шаром FePt та магнітно-м'яким шаром FeAu. Було досліджено, що параметр кристалічної ґратки частинок FeAu набагато більший ніж у частинок FePt, що є рушійною силою впорядкування фази  $L1_0$ -FePt. Додавання ж магнітно-м'якого шару FeAu сприяє зниженню температури впорядкування на 150 °C. Збільшення товщини шару FeAu призводить до зменшення коерцитивної сили [24].

У роботі [25] досліджено вплив товщини шару заліза на магнітні властивості. Також показано, що при товщині заліза менше ніж 3 нм подвійні шари FePt(10 нм)/Fe(x нм) проявляють властивості магнітно-твердої фази з коерцитивною силою  $H_C \approx 10$  кЕ. Зі збільшенням товщини шару Fe, коерцитивна сила матеріалу зменшується і плівкові композиції FePt(10 нм)/Fe(10 нм) проявляють магнітно-м'які властивості [25].

У роботі [26] встановили, що багатшарова структура Fe-Pt ефективно впливає на магнітні властивості та температуру впорядкування плівкових композицій. За результатами було зроблено висновок, що найвищу коерцитивну

силу можливо отримати при однаковій товщині шарів Fe і Pt. В іншому випадку спостерігається формування фаз  $\text{Fe}_3\text{Pt}$  та  $\text{FePt}_3$ . При цьому товщина шарів Fe і Pt впливає на температуру впорядкування і коерцитивна сила. В даній роботі найвищі значення коерцитивної сили отримано в плівкових композиціях  $[\text{Fe}(3,6 \text{ нм})/\text{Pt}(3,6 \text{ нм})]_{10}/\text{SiO}_2$ , при температурі відпалу  $350^\circ\text{C}$  впродовж 30 с ( $H_c = 161,3 \text{ кА/м}$ ) [26].

Проте, беручи до уваги велику кількість як теоретичних так і експериментальних робіт, присвячених вивченню дифузійного формування магнітно-твердих плівок FePt, матеріалознавчі задачі, які необхідні для практичного використання цих матеріалів, не можна вважати вирішеними у повній мірі.

Припускається, що напруження, які виникають на границях поділу між шарами Fe та Pt в результаті різних параметрів їх кристалічної будови і температурних коефіцієнтів лінійного розширення можуть бути додатковою рушійною силою для перебігу дифузійних процесів. Виходячи з цього доцільним є дослідження процесів фазоутворення в багатошарових плівкових композиціях. Для формування уявлень впливу границь поділу шарів на формування фазового складу плівкової композиції залізо-платина, в даній роботі досліджено плівкові композиції з чотирьохкратним повторенням шарів. Загальна товщина обох плівкових композицій еквівалентна, а товщини шарів заліза та платини підбирались таким чином для забезпечення еквіатомного складу гомогенного плівкового матеріалу після відпалу.

### **1.5 Вплив напруженого стану на фазовий перехід $A1 \rightarrow L1_0\text{-FePt}$**

Багато досліджень свідчить, що на кінетику процесу упорядкування в плівках FePt впливають механічні напруження [17-31].

Напружений стан у плівках на основі FePt викликається: термічними напруженнями через різницю між коефіцієнтами термічного розширення шарів

плівки та підкладки [36, 37]; зміною напруженого стану при фазовому перетворенні  $A1 \rightarrow L1_0$ , що супроводжується зміною об'єму елементарних комірок впорядкованої та неупорядкованої фаз [28] та напруженнями, пов'язаними з невідповідністю параметрів елементарної ґратки плівки FePt і підкладки або шару легуючого елементу [31].

Еволюцію внутрішніх механічних напружень в тонких плівках FePt в процесі відпалу *in situ* вперше спостерігали Wierman і ін. [19]. Результати дослідження показали, що впорядкування в плівках FePt нейтралізує початковий стискаючий напружений стан. Введення динамічних розтягуючих напружень прискорює процес упорядкування [22].

Пружні напруження і деформації, що виникають при швидкому термічному відпалі сприяють еволюції кристалографічної анізотропії плівок FePt і орієнтованому росту зерен фази  $L1_0$ -FePt в напрямку [001] [19-40].

В роботі [40] показано істотну відмінність в напруженому стані плівок FePt, відпал яких здійснювався *in situ* і в разі відпалу після осадження. Зміна напруженого стану автори пов'язували з еволюцією механізмів зростання плівок. Вони впевнені, що динамічна релаксація напруження є основним фактором у відмінності поведінки залишкового напруження, оскільки атомна рухливість адатомів під час осадження для відпалу *in situ* набагато більше, ніж відпалених плівок після осадження [30].

Про вплив тиску на фазовий перетворення з неупорядкованою фази в упорядковану в масивних матеріалах, вперше повідомлено в роботі [33]. Зовнішній напружений стан може або допомогати, або перешкоджати фазовому переходу сплаву FePt з неупорядкованого в упорядкований стан.

Зміну кінетики фазового перетворення  $L1_0$  було досягнуто шляхом регулювання напружень внаслідок невідповідності параметрів кристалічної ґратки між буферним шаром і плівкою FePt [32]. При легуванні Cu плівок  $(\text{FePt})_{85}\text{Cu}_{15}$  спостерігається більш висока швидкість фазового переходу  $A1$ -FePt  $\rightarrow L1_0$ -FePt зі зниженням рівня механічних напружень [43].

У плівках FePt/Au аналогічно пояснили зниження температури впорядкування плівок FePt до 350 °С. При цьому, під час відпалу атоми Au частково дифундують по межах зерен FePt, де створюють парамагнітні стінки, що призводить до високих значень коерцитивної сили  $H_C$  [38].

В роботі [35] було встановлено, що зміна значень рівня механічних напружень в осаджених плівках FePt від стискаючих -1,01 ГПа до розтягуючих 0,18 ГПа приводила до зниження енергії активації процесу упорядкування в межах (0,387-0,23) еВ/атом. Це викликає зменшення температури впорядкування порядку на 100 °С. Автори також виявили, що поява ущільнення перед процесом впорядкування викликає збільшення розтягуючих напружень близько 1 ГПа [25]. При цьому показано, що великі початкові напружені стани (стиснення або розтягнення) можуть пригнічувати процес упорядкування. Велике стискаюче напруження збільшує енергетичний бар'єр процесу впорядкування, в той же час велике розтягуюче напруження блокує утворення фази  $L1_0$ -FePt, запобігаючи ущільнення, попередній процес до упорядкування. Виявлено, що існують критичні рівні як стискаючих, так і розтягуючих напружень, які підвищують температуру формування фази  $L1_0$ .

Товщина плівки також має істотний вплив на реакцію на межі поділу і таким чином може бути використана для регулювання процесу впорядкування  $L1_0$  плівок FePt [23-25, 30-31].

## 1.6 Висновки до розділу 1

1. Після аналізу літературних джерел було визначено, що матеріали на основі FePt є перспективними матеріалами для використання в якості магнітних носіїв інформації. Проте, беручи до уваги велику кількість як теоретичних так і експериментальних робіт, присвячених вивченню дифузійного формування магнітно-твердих плівок FePt, матеріалознавчі задачі, які необхідні для

практичного використання цих матеріалів, не можна вважати вирішеними у повній мірі.

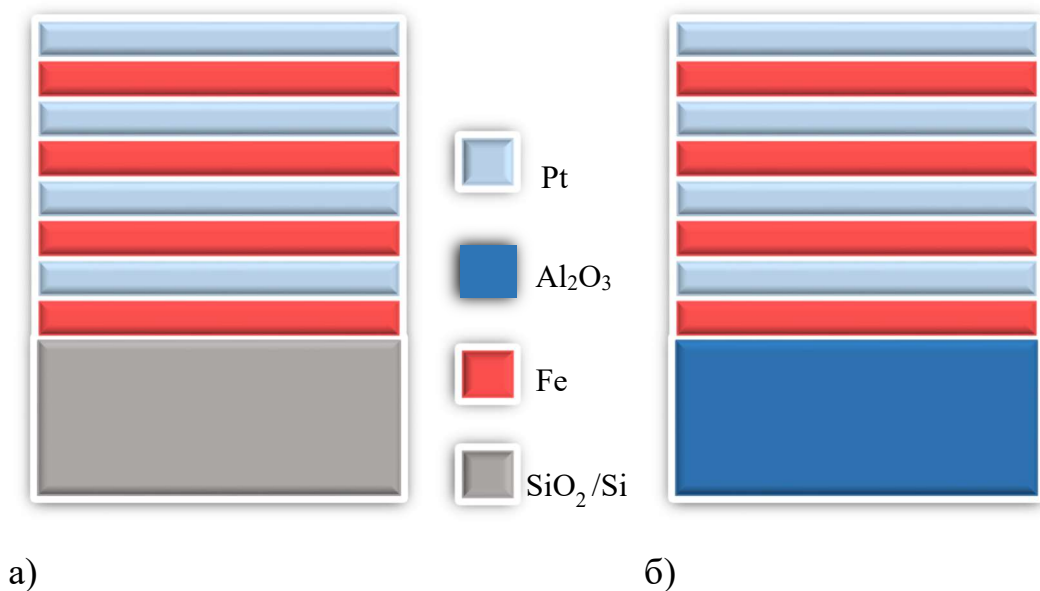
2. Було виділено напрямок дослідження, а саме вплив додаткових границь поділу між окремими шарами Fe та Pt на структуро- і фазоутворення в плівкових композиціях на основі FePt, який має науковий інтерес. Припускається, що напруження, які виникають на границях поділу між шарами Fe та Pt в результаті невідповідності параметрів їх кристалічної будови і температурних коефіцієнтів лінійного розширення можуть слугувати додатковою рушійною силою для перебігу дифузійних процесів. Тому доцільним є дослідження процесів фазоутворення в багатошарових плівкових композиціях.

## 2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА

### 2.1 Вибір композицій для дослідження

У роботі досліджено термічно індуковані дифузійні процеси формування впорядкованої фази  $L1_0$ -FePt у нанорозмірних плівкових композиціях.

Було досліджено нанорозмірні плівкові композиції FePt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[10 $\bar{1}$ 0] та FePt/SiO<sub>2</sub>/Si(001), схематичне зображення яких відображено на рисунку 2.1:



а) [Fe/Pt]<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/Si(001), б) [Fe/Pt]<sub>4</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[10 $\bar{1}$ 0]

Рисунок 2.1 – Схематичне зображення плівкових композицій

### 2.2 Магнетронне осадження плівкових композицій

Нанорозмірні плівкові композиції було отримано за допомогою магнетронного осадження шарів Pt та Fe на підкладку термічно окисненого монокристалічного кремнію SiO<sub>2</sub>/Si та сапфіру Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Температура підкладки при осадженні залишалась кімнатною. Початковий тиск у робочому об'ємі складав  $5 \times 10^{-2}$  Па.



Процес магнетронного осадження плівок у вакуумі полягає в розпорошенні твердої мішені матеріалу іонами інертного газу, які, в свою чергу, утворюються в плазмі аномального тліючого розряду при прикладенні до неї магнітного поля [2].

Основними елементами магнетрона є катод – мішень, анод і магнітна система (рис. 2.2). Особливість магнетронного розпилювача полягає у наявності двох перехрещених полів – електричного та магнітного. Силкові лінії магнітного поля замикаються між полюсами магнітної системи. Поверхня мішені, розташована між системами входу і виходу силових ліній магнітного поля, інтенсивно розпорошується та має вид замкнутої доріжки, її геометрія визначається формою полюсів магнітної системи. Тліючий розряд збуджується при подачі постійної напруги між мішенню (негативний потенціал) і анодом (позитивний потенціал) і подальшого виникнення неоднорідного електричного поля .

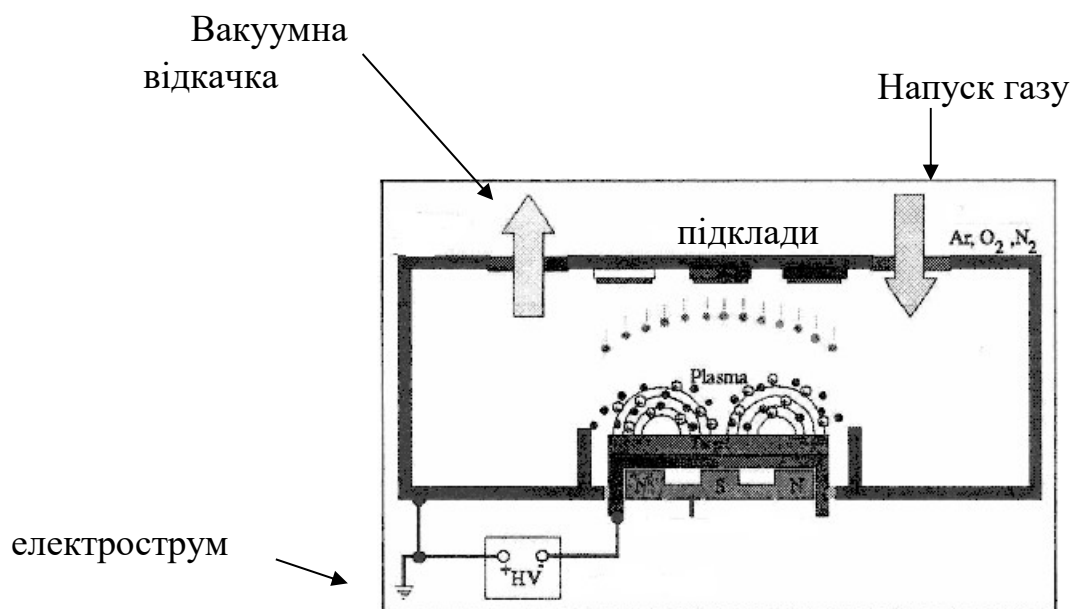


Рисунок 2.2 – Принципова схема методу магнетронного осадження [2]

Можливість локалізації плазми розряду безпосередньо в мішені пояснюється наявністю замкненого магнітного поля до поверхні мішені, що розпорошується. Якщо з мішені-катода буде випущено електрон (за рахунок вторинної електронної емісії), то його траєкторія руху визначатиметься дією на нього магнітного та електричного полів.

Під впливом електричного поля електрон буде рухатися до анода. Дія магнітного поля на рухомий заряд призведе до виникнення сили Лоренца, яка буде спрямована перпендикулярно до напрямку швидкості руху електрона. Сумарна дія цих сил призведе до того, що електрон буде рухатися паралельно поверхні мішені за складною замкнутою траєкторією, близькою до циклоїди.

Траєкторія руху замкнута, тому електрон буде рухатися по ній до тих пір, поки не відбудеться декілька зіткнень з атомами робочого газу, в результаті яких відбудеться їх іонізація, а сам електрон, втратить швидкість і переміститися за рахунок дифузії до аноду. Таким чином, велика частина енергії електрона, до того як він попадає на анод, використовується на іонізацію і збудження, що значно збільшує ефективність процесу іонізації і призводить до зростання концентрації позитивних іонів поблизу поверхні мішені. Це, у свою чергу, призводить до збільшення інтенсивності іонного бомбардування мішені і значного росту швидкості осадження плівки.

Товщина, одержаних магнетронним методом плівок, визначалась, виходячи зі швидкості розпорошення кожної мішені при осадженні, а також контролювалась за допомогою кварцового резонатору і профілометричного аналізу.

Вказаний спектр методів забезпечував точність вимірювання товщини осаджених плівок на рівні  $\pm 0,1$  нм.

## 2.3 Методи дослідження структури, фазового складу та магнітних властивостей плівок Fe-Pt

### 2.3.1 Рентгеноструктурний фазовий аналіз

Мета рентгеноструктурного аналізу - встановлення відповідності між атомною структурою досліджуваного зразка та просторовим розподілом рентгенівського випромінювання, розсіяного зразком. Якісний фазовий аналіз використовують для встановлення фаз, присутніх в зразку.

Рентгеноструктурний фазовий аналіз було проведено на установці Rigaku Ultima IV із використанням сцинтиляційного лічильника у випромінюванні  $\lambda_{K\alpha}$ -Cu. Дифрактометричні дослідження з використанням сцинтиляційних лічильників проведено у фокусуючій геометрії за Брегом-Брентано (рис. 2.3).

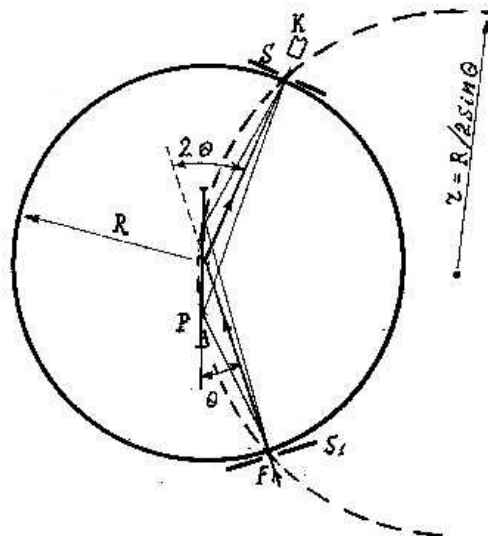


Рисунок 2.3 – Схема фокусуючої геометрії за Брегом-Брентано [44]

Плоский зразок  $P$  розміщують так, щоб його поверхня знаходилась на осі обертання  $O$  гоніометра. Умовою фокусування є розміщення фокусу трубки  $F$ , поверхні зразка та щілини лічильника  $S$  на одному колі радіусом  $r = R/2 \sin \theta$ , де  $R$  – радіус гоніометра.

Особливістю фокусування за Брегом-Брентано є розміщення зерен полікристалічного зразка у відбиваючому положенні (кут  $\Theta$ ).

При зміні положення детектора на певний кут, зразок обертається на кут який вдвічі менший до нього.

Умовою дифракції рентгенівських променів на кристалічній ґратці є умова Вульфа–Брегга:

$$2d \sin \theta = n\lambda, \quad (2.1)$$

де  $d$  – міжплощинна відстань, властива даній фазі, Å

$\theta$  – кут дифракції рентгенівського променя даною системою атомних площин;

$\lambda$  – довжина хвилі випромінювання монохроматичних рентгенівських променів, падаючих на кристал, Å;

$n$  – порядок дифракційного максимуму (ціле число).

Інтенсивність рефлексу визначається кількістю даної фази. Інтенсивність рефлексу також залежить від режиму роботи рентгенівського апарату, таких параметрів як: струм який протікає через трубку, напруга на трубці, розмір щілин, а також режиму роботи лічильника квантів рентгенівського випромінювання. Якщо досліджуваний об'єкт складається з кількох фаз, то у кожної фази буде своя індивідуальна дифракційна картина. В цьому випадку дифрактограма є накладенням дифрактограм всіх наявних фаз у зразку, що досліджується [24, 25].

Мірою чутливості рентгенівського фазового аналізу являється мінімальна кількість речовини в суміші, що дає достатній для визначення наявності цієї фази в зразку набір її характерних рефлексів. У різних фаз і різних сумішей фаз чутливість різна. Вона збільшується при збільшенні «відбивної» здатності атомної площини фази, присутність якої треба виявити, і тим більша чим менший фон дифрактограми. Важливим є також співвідношення коефіцієнтів поглинання

всієї суміші і фази яку необхідно визначити. Речовини, що сильно розсіюють рентгенівське випромінювання, легко виявити в слабо розсіюючій суміші. Сполуки легких елементів в поєднанні із сполуками важких елементів можна виявити лише при їх великому вмісті.

Якщо лінії визначуваної фази розмиті через наявність мікронапружень, або дисперсності зразка, або неоднорідності його за складом, або, якщо утворюється твердий розчин, то чутливість рентгенівського фазового аналізу різко знижується.

Чутливість фазового аналізу підвищується при наявності текстури (кристали мають переважну орієнтацію якогось певного кристалографічного напрямку) в фазі, яку треба виявити. Останнє призводить до того, що деякі лінії на дифрактограмі посилюються, а деякі, навпаки, зникають. Наявність сильних ліній і дозволяє виявити меншу, ніж у відсутності текстури, кількість фази [24,25].

За даними дифрактометричного аналізу розраховувався розмір областей когерентного розсіювання (розмір зерен FePt) в нанорозмірних плівках з використанням формули Дебая-Шерера. Припускається, що в даному випадку розмір областей когерентного розсіювання співпадає з розміром нано-зерен:

$$d = (0,9\lambda)/(B\cos\theta), \quad (2.2)$$

де  $d$  – розмір зерна;

$\lambda$  – довжина хвилі рентгенівського випромінювання;

$B$  – ширина дифракційного рефлексу на половині висоти;

$\theta$  – кутове положення дифракційного рефлексу.

Залишкові деформації можна визначити за формулою:

$$\varepsilon_{\perp} = \frac{d_{\perp} - d_0}{d_0}, \quad (2.3)$$

Значення міжплощинної відстані  $d_0$  для ненапруженого стану бралось з картотеки ASTM для неупорядкованої фази  $A1\text{-FePt}$  (0,2235 нм) та  $L1_0\text{-FePt}$  (0,219 нм).

### 2.3.2 Атомно-силова мікроскопія

Поверхневу шорсткість плівкових композицій досліджено за допомогою атомно-силового мікроскопу Digital Instruments Dimension 3000.

Атомний силовий мікроскоп — високотехнологічний науковий прилад, який дозволяє отримати зображення поверхні зразків із роздільною здатністю порядку кількох нанометрів.

В атомно силовому мікроскопі тонкий щуп, розташований на кінці консольної балки, сканує поверхню. Високоточне переміщення поверхні під щупом забезпечуються п'єзоелектричними елементами, що змінюють свою довжину в залежності від прикладеної напруги. Рухаючись над нерівною поверхнею, щуп, відповідно до типу нерівності, або підіймається, або опускається, і ці дуже малі вертикальні переміщення відображаються за допомогою лазерного променя, який потрапляє на верхню поверхню консольної балки з прикріпленою до нього дзеркальною поверхнею. Хоча вертикальні переміщення дзеркала дуже малі, відбитий від нього промінь відхиляється на кут, достатньо значний, для вимірювання за допомогою матричного фотодетектора. Сигнал який було отримано аналізується за допомогою електроніки й перетворюється в зображення поверхні. При скануванні зразок переміщується за допомогою прецизійних п'єзодвигунів, які регулюються комп'ютером. По завершенню сканування на екран виводиться двовірне (тривірне) зображення морфології поверхні зразка.

Схематично принцип дії атомно-силового мікроскопу представлено на рис. 2.4.

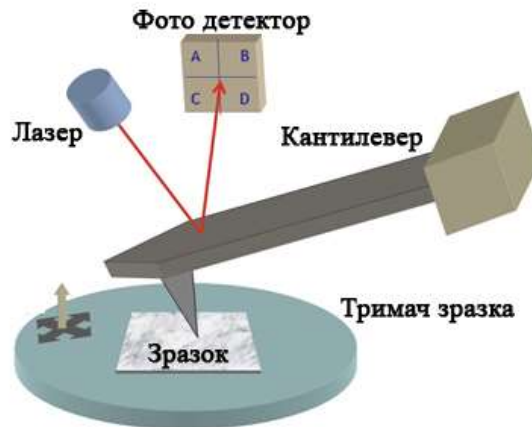


Рисунок 2.4 – Схема роботи атомно-силового мікроскопу

Існує три основних режими роботи атомно-силового мікроскопу: контактний, безконтактний та вібраційний. Найбільш високу роздільну здатність забезпечує контактний метод, при якому голка торкається поверхні зразка під час його сканування. В безконтактному режимі вістря голки коливається над поверхнею зразка з частотою 100 КГц – 1 МГц. Цей режим підвищує чутливість атомно-силового мікроскопу, в результаті чого можуть бути зафіксовані навіть ван-дер-ваальсові та електростатичні сили. Недоліком цього режиму роботи є виникаючий високий тиск, який може викликати пошкодження зразка і вістря голки. Вібраційний режим поєднує в собі елементи контактного та безконтактного режимів. В вібраційному режимі кантилевер коливається з більшою амплітудою і вістря голки дотикається до поверхні зразка на короткі проміжки часу, внаслідок чого роздільна здатність є такою ж як при контактному режимі, а пошкодження зразка чи голки відсутні.

### 2.3.3 SQUID - магнітометрія

Дослідження магнітних характеристик тонких плівок було проведено на кафедрі експериментальної фізики університету Аугсбургу, Німеччина.

SQUID – «надпровідний квантовий інтерференційний пристрій», надчутливий магнітометр, що використовується для вимірювання слабких магнітних полів і дослідження магнітних властивостей нанорозмірних плівок.

В даній роботі використовувався магнітометр MPMS SQUID VSM (рис. 2.5.) виробництва Quantum Design, який має чутливість  $< 8 \times 10^{-8}$  емо при максимальному прикладеному полі 70 кЕ. Магнітні дослідження можуть проводитися при температурах від  $-271^{\circ}\text{C}$  до  $127^{\circ}\text{C}$  при стандартному налаштуванні і до  $737^{\circ}\text{C}$  при наявності додаткової високотемпературної приставки. В даній роботі всі виміри проведені за кімнатної температури.

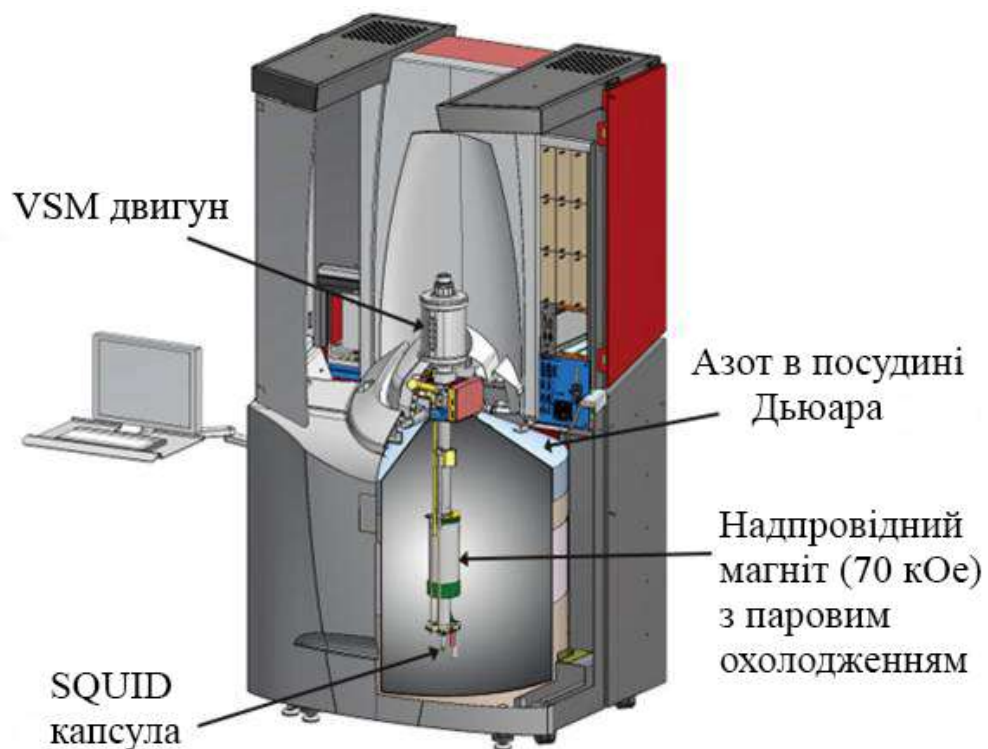


Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд приладу MPMS SQUID VSM

Найпростіший квантовий магнітометр-SQUID – надпровідне кільце з двома джозефсонівськими тунельними контактами, який є аналогом оптичного ефекту з інтерференцією від двох щілин (тільки в даному випадку інтерферують не світлові хвилі, а два джозефсонівських струми). Важливим для розуміння роботи SQUID - магнітометра є наявність хвильових властивостей електрона. Хвиля електронів поділяється на дві, кожна з яких проходить свій тунельний контакт, а потім обидві хвилі з'єднують разом. У випадку відсутності



зовнішнього поля обидві гілки будуть однакові – різниця фаз відсутня. Але при наявності магнітного поля в контурі виникає різниця фаз і при з'єднанні хвиль електронів спостерігатиметься явище інтерференції.

Магнітні сигнали, що реєструються SQUID – магнітометром звичайно складаються з часткових сигналів від магнітного шару, підкладки і тримача зразків. Так як внески від підкладки і тримача зазвичай матимуть лінійну залежність від прикладеного поля, то їх значення визначались і віднімалися за допомогою виміру магнітних кривих при полях, вищих за поле насичення магнітного шару.

#### 2.3.4 Розрахунок термічних напружень

Термічні напруження знаходили шляхом розрахунків:

$$\sigma_{th} = \frac{E}{1 - \nu} \Delta T \cdot \Delta \alpha, \quad (2.4)$$

де  $E$  – модуль Юнга;

$\nu$  - коефіцієнт Пуасона;

$\Delta T$  - різниця між кімнатною температурою та температурою відпалу;

$\Delta \alpha$  - різниця між коефіцієнтами термічного розширення підкладки та плівки FePt

#### 2.5 Висновки до розділу 2

В даній роботі використано широкий спектр методів сучасного фізичного матеріалознавства: метод магнетронного осадження плівкових композицій,

швидкий термічний відпал в атмосфері нітрогену, метод рентгеноструктурного фазового аналізу, атомно-силову мікроскопію, SQUID-магнітометрію. Дані методики дозволяють отримати інформацію про структуру, фазовий склад та магнітні властивостей плівкових композицій.

### 3 РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У роботі представлено результати дослідження формування фазового складу і структури та їх вплив на магнітні властивості нанорозмірних плівок  $[\text{Pt}/\text{Fe}]_4$ , які були одержані методом магнетронного осадження на підкладки монокристалічного сапфіру з орієнтацією  $(10\bar{1}0)$  та термічно окисненого монокристалічного кремнію  $\text{SiO}_2(100 \text{ нм})/\text{Si}(001)$ , при швидкому термічному відпалі у нітрогені.

#### 3.1 Вплив швидкого термічного відпалу у нітрогені на формування фазового складу і магнітні властивості багатошарової нанорозмірної плівкової композиції $[\text{Pt}/\text{Fe}]_4$ на підкладці $\text{Al}_2\text{O}_3[10\bar{1}0]$

В цьому підрозділі представлені результати дослідження фазового складу, структури та магнітних властивостей плівкової композиції  $[\text{Pt}/\text{Fe}]_4$  на підкладці  $\text{Al}_2\text{O}_3[10\bar{1}0]$  після швидкого термічного відпалу у нітрогені.

##### 3.1.1 Формування фазового складу нанорозмірної плівкової композиції $[\text{Pt}/\text{Fe}]_4$ на підкладці $\text{Al}_2\text{O}_3[10\bar{1}0]$ при відпалі у нітрогені

Після осадження на дифрактограмі плівкової композиції  $[\text{Pt}(4,2 \text{ нм})/\text{Fe}(3,2 \text{ нм})]_4$  спостерігається рефлекс  $(111)$  ( $2\theta = 40,08^\circ$ ) від деформованої кристалічної ґратки Pt та сателіти, що свідчить про багатошарову структуру плівкової композиції (рис. 3.1).

Після відпалу за температури  $500^\circ\text{C}$  сателіти на дифрактограмі зникають, а рефлекс  $(111)$  зміщується у бік більших кутів. Це свідчить, що на межах поділу відбулися дифузійні процеси, що привели до зміни фазового складу плівки (рис. 3.2).

Після термообробки при температурі 600 °C у плівковій композиції формується впорядкована фаза  $L1_0$ –FePt (рис. 3.3). Процес упорядкування супроводжується появою на дифрактограмі надструктурного рефлексу (001) та зміщенням рефлексу (111) в бік великих кутів.

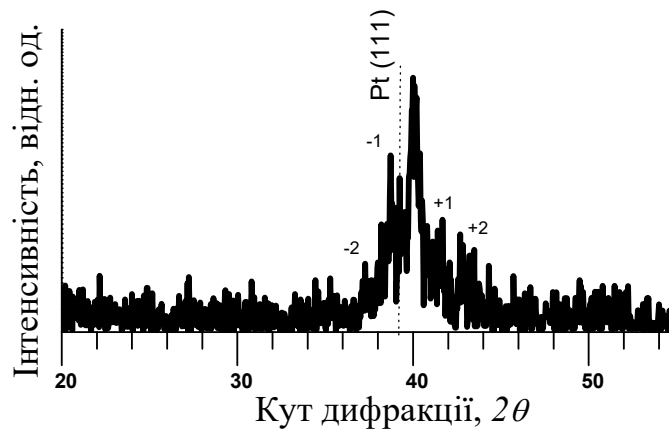


Рисунок 3.1– Дифрактограма плівки  $[Pt/Fe]_4$  на підкладці  $Al_2O_3[10\bar{1}0]$  після осадження

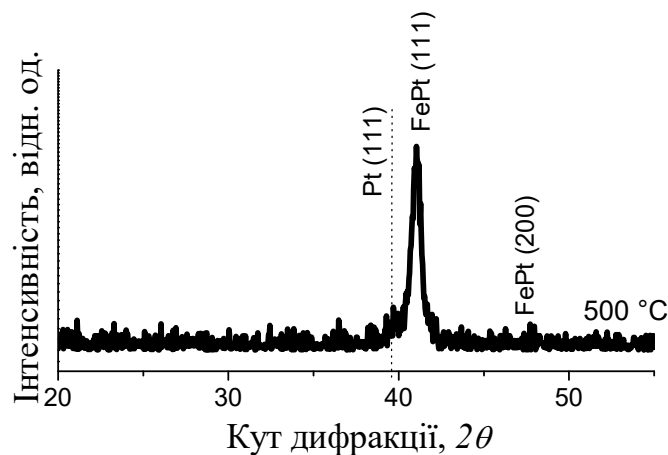


Рисунок 3.2– Дифрактограма плівки  $[Pt/Fe]_4$  на підкладці  $Al_2O_3[10\bar{1}0]$  після відпалу у нітрогені за температури 500 °C

З підвищенням температури термічної обробки збільшується кількість упорядкованої фази у плівці, що відображається у збільшенні інтенсивностей

надструктурних рефлексів (001) та (002). У той же час інтенсивність рефлексу (111) від впорядкованої фази  $L1_0$ –FePt змінюється незначно (рис. 3.4, рис. 3.5) .

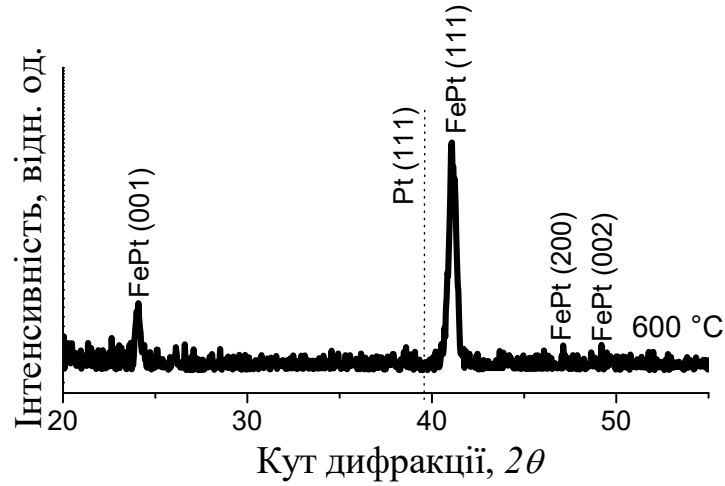


Рисунок 3.3 – Дифрактограма плівки  $[Pt/Fe]_4$  на підкладці  $Al_2O_3[10\bar{1}0]$  після відпалу у нітрогені за температури 600 °C

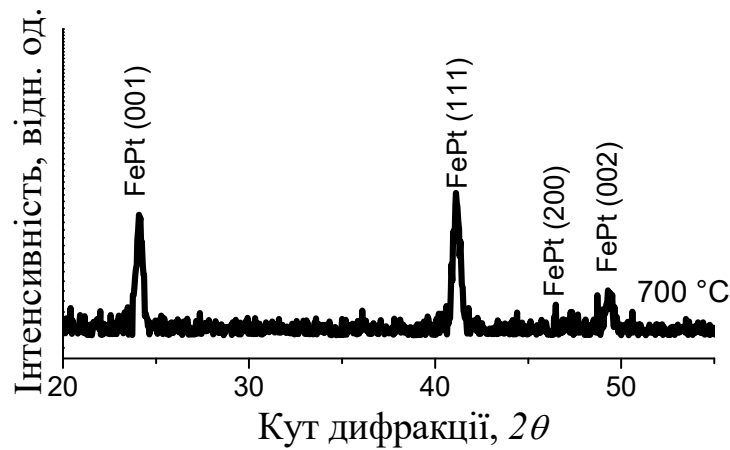


Рисунок 3.4 – Дифрактограма плівки  $[Pt/Fe]_4$  на підкладці  $Al_2O_3[10\bar{1}0]$  після відпалу у нітрогені за температури 700 °C

За результатами рентгеноструктурного аналізу було розраховано параметри кристалічної структури фази  $L1_0$ -FePt, такі як періоди ґратки  $a$  і  $c$  та ступінь тетрагональності  $c/a$  (рис. 3.6 –3.7) .

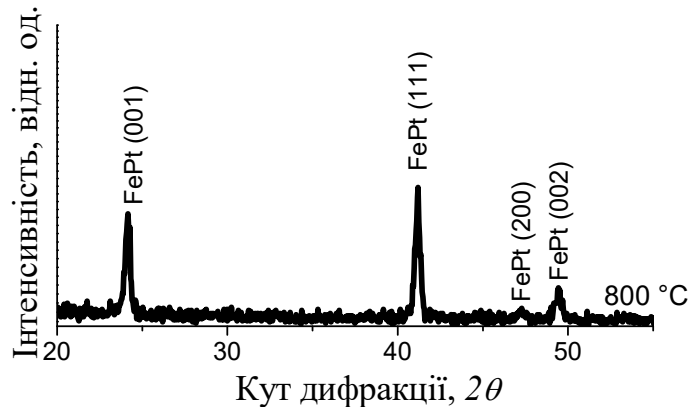


Рисунок 3.5 – Дифрактограма плівки  $[Pt/Fe]_4$  на підкладці  $Al_2O_3[10\bar{1}0]$  після відпалу у нітрогені за температури 800 °С

При підвищенні температури термічної обробки з 600 °С до 800 °С період ґратки  $a$  суттєво не змінюється, а параметр  $c$  зменшується від 0,37 нм до 0,3686 нм (рис. 3.6, рис. 3.7). Ступінь тетрагональності  $c/a$  змінюється в межах похибки (рис. 3.8).

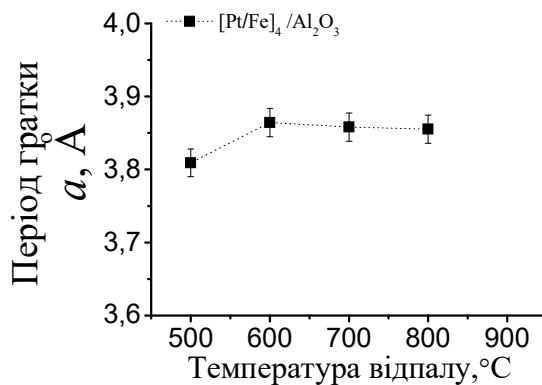


Рисунок 3.6 - Залежність періоду ґратки  $a$  фази  $L1_0$ -FePt у плівковій композиції  $[Pt/Fe]_4$  на підкладці  $Al_2O_3[10\bar{1}0]$  від температури відпалу у нітрогені

При утворенні впорядкованої фази зменшується об'єм елементарної комірки FePt (рис. 3.9)

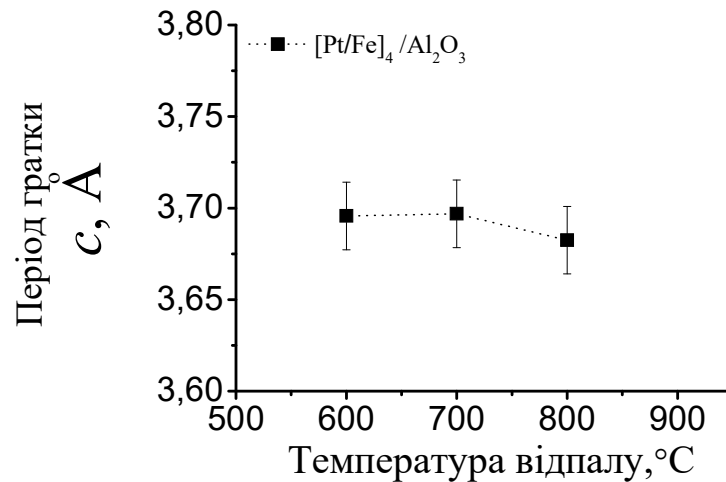


Рисунок 3.7 - Залежність періоду ґратки  $c$  фази  $L1_0$ -FePt у плівковій композиції  $[Pt/Fe]_4$  на підкладці  $Al_2O_3[10\bar{1}0]$  від температури відпалу у нітрогені

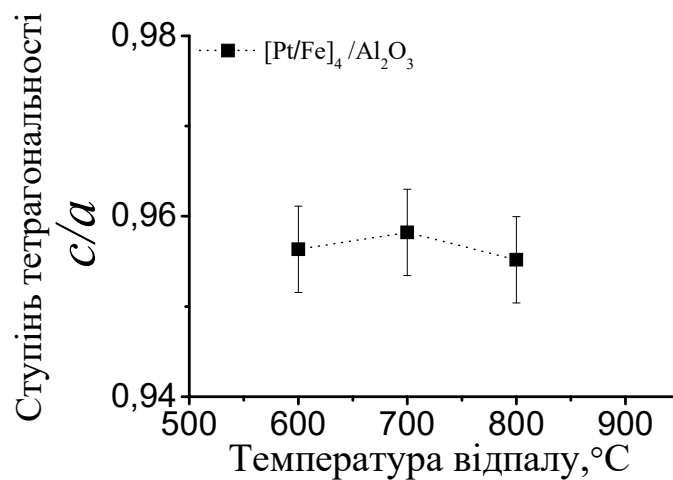


Рисунок 3.8 - Залежність ступеню тетрагональності фази  $L1_0$ -FePt у плівковій композиції  $[Pt/Fe]_4$  на підкладці  $Al_2O_3[10\bar{1}0]$  від температури відпалу у нітрогені

Відношення  $I(001)/I(002)$  вказує на ступінь упорядкування плівок (рис. 3.10). З підвищенням температури відпалу відношення інтенсивностей

рефлексів (001) та (002) зростає, що показує збільшення кількості упорядкованої фази та ступеню впорядкування.

Відношення  $I(002)/I(111)$ , яке визначає кількість зерен з орієнтацією вісі  $c$  у напрямку [001] по нормалі до площини плівки залишається майже не змінним (рис.3.11).

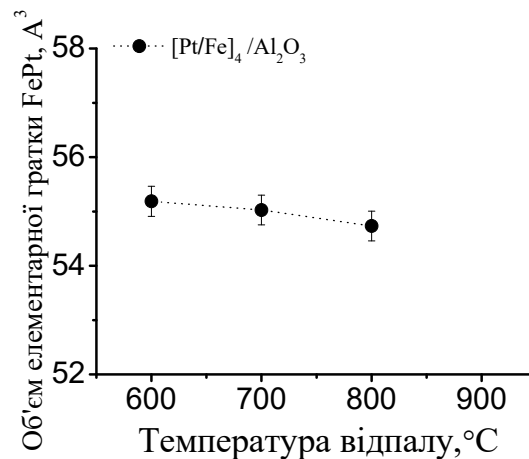


Рисунок 3.9 – Зміна об'єму елементарної комірки фази  $L1_0$ -FePt у плівковій композиції  $[Pt/Fe]_4$  на підкладці  $Al_2O_3[10\bar{1}0]$  з температурою відпалу у нітрогені

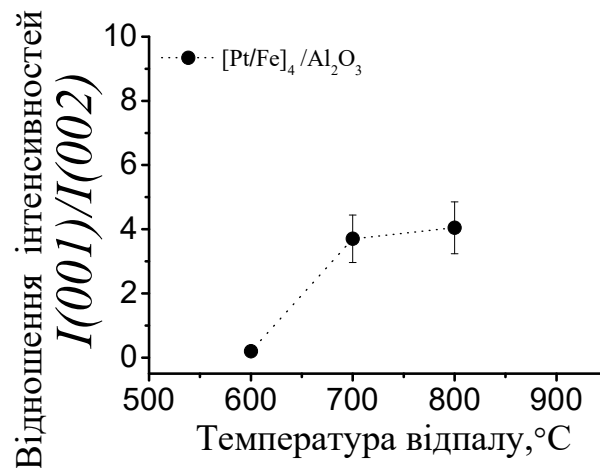


Рисунок 3.10 - Зміна відношення інтенсивностей  $I(001)/I(002)$  фази  $L1_0$ -FePt у плівковій композиції  $[Pt/Fe]_4$  на підкладці  $Al_2O_3[10\bar{1}0]$  від температури відпалу у нітрогені



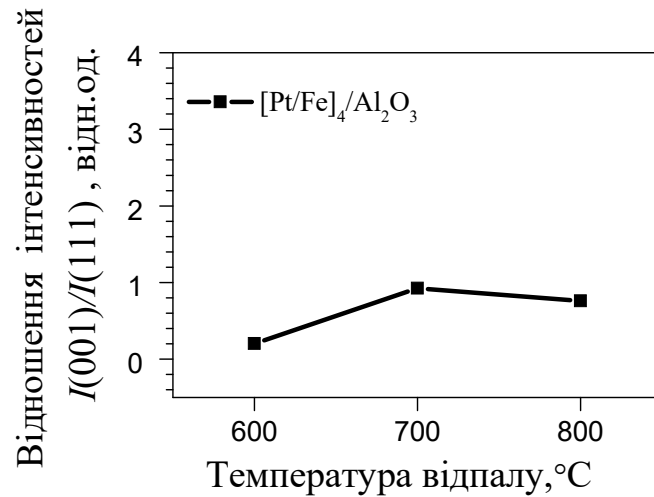


Рисунок 3.11 - Зміна відношення інтенсивностей  $I(001)/I(111)$  фази  $L1_0$ -FePt у плівковій композиції  $[Pt/Fe]_4$  на підкладці  $Al_2O_3[10\bar{1}0]$  від температури відпалу у нітрогені

Використовуючи формулу Дебая-Шеррера розраховано та побудовано залежність розміру зерен фази  $L1_0$ -FePt від температури відпалу (рис. 3.12). Збільшення температури відпалу призводить до росту областей когерентного розсіювання (розміру зерен) фази  $L1_0$ -FePt. Зерно зростає від 12 нм до 17 нм.

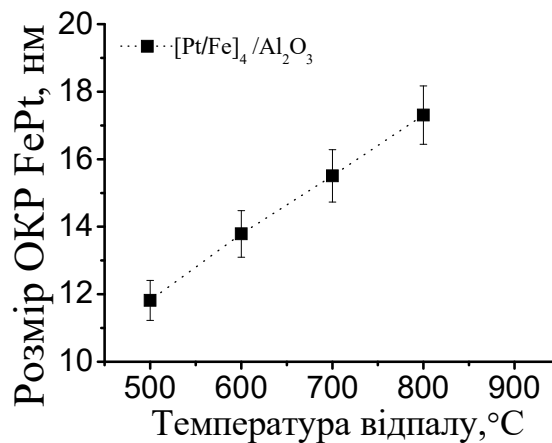


Рисунок 3.12 – Залежність розміру зерна фази  $L1_0$ -FePt у плівковій композиції  $[Pt/Fe]_4$  на підкладці  $Al_2O_3[10\bar{1}0]$  від температури відпалу у нітрогені

### 3.1.2 Магнітні властивості плівкової композиції $[\text{Fe}/\text{Pt}]_4$ на підкладці $\text{Al}_2\text{O}_3[10\bar{1}0]$ після відпалу у нітрогені

Нижче наведено результати дослідження формування фазового складу і структури, та їх вплив на магнітні властивості нанорозмірної плівки FePt, яка була одержана методом магнетронного осадження, на підкладки монокристалічного сапфіру з орієнтацією  $(10\bar{1}0)$  після осадження та відпалів у нітрогені.

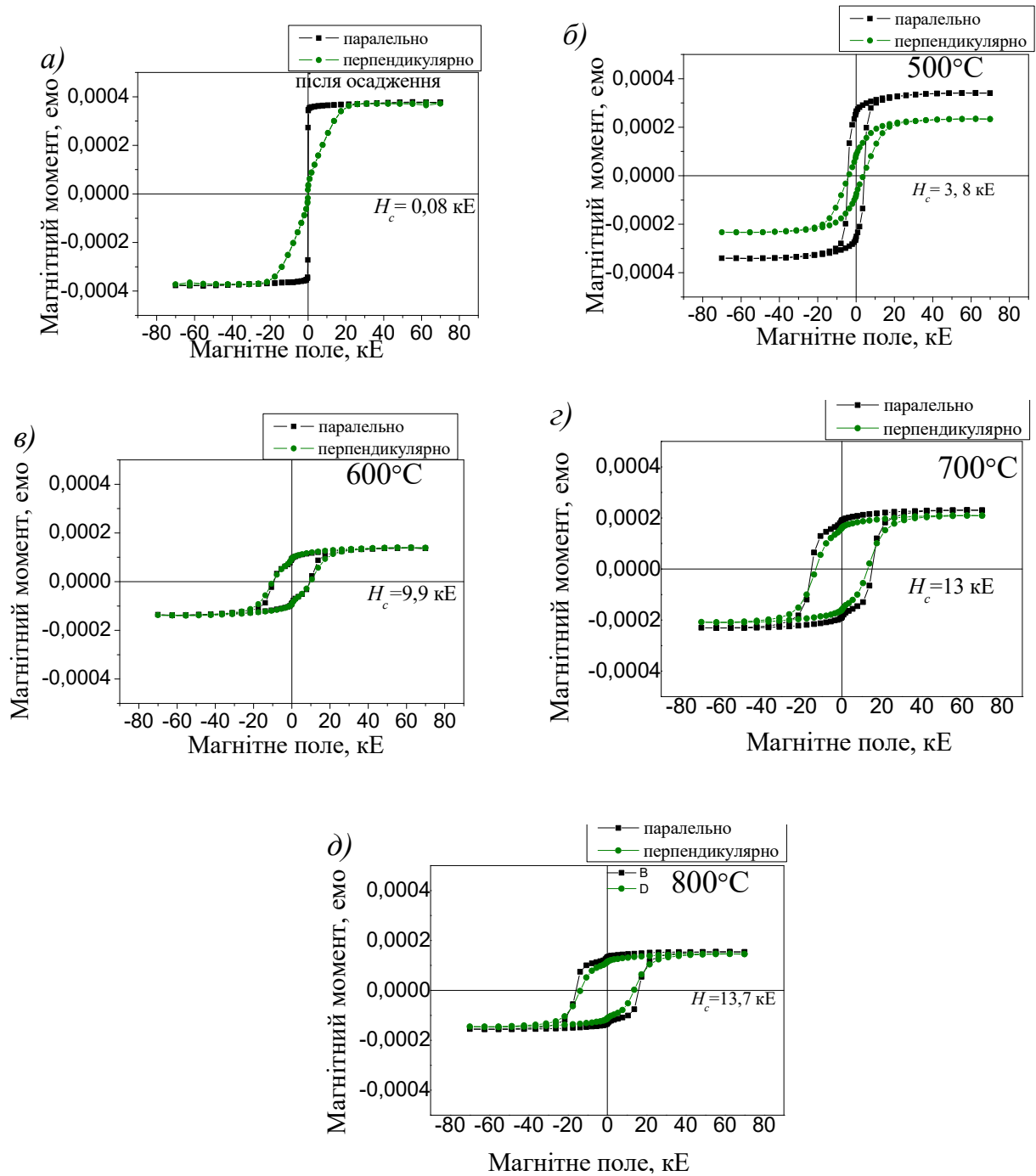
За допомогою методу SQUID-магнітометрії було отримано криві намагнічування плівок  $[\text{Pt}/\text{Fe}]_4$  в паралельно та перпендикулярно прикладеному до підкладки магнітному полі після осадження та швидкого термічного відпалу за температур  $500\text{ }^\circ\text{C} - 700\text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 3.13).

Магнітні властивості плівок  $[\text{Pt}/\text{Fe}]_4/\text{Al}_2\text{O}_3$  зазнають змін зі зміною температури відпалу. Дані плівкові системи є магнітно-ізотропними, про що свідчить значення коерцитивної сили (до 18 кЕ).

Швидкий термічний відпал стимулює виникнення додаткових механічних напружень в плівках, цим самим прискорює процес впорядкування та сприяє зростанню зерен з віссю легкого намагнічування  $c$  у напрямку  $[001]$ , перпендикулярному площині плівки.

Після осадження плівка є магнітно-м'якою так як значення коерцитивної сили становить біля 50 Е (рис. 3.13 а). Значення коерцитивної сили після відпалу за температури  $500\text{ }^\circ\text{C}$  становить 3,8 кЕ (рис. 3.13 б). Це підтверджує початок формування впорядкованої фази  $L1_0\text{-FePt}$ . Також це підтверджує магнітно-тверді властивості плівки. Після відпалу при  $600\text{ }^\circ\text{C}$  коерцитивна сила збільшується до 9,9 кЕ (рис. 3.13 в).

Плівки залишаються в магнітно-ізотропному стані навіть після високотемпературних відпалів, оскільки криві намагнічування при магнітному полі, прикладеному паралельно і перпендикулярно до поверхні зразка мають подібну форму (рис. 3.13 б-г).



а) після осадження; б) 500°C; в) 600°C ; г) 700°C; д) 800°C

Рисунок 3.13 – Криві намагнічування  $M(H)$  плівкової композиції  $[\text{Pt/Fe}]_4/\text{Al}_2\text{O}_3$  (1010) в паралельно та перпендикулярно прикладеному до підкладки магнітному полі після осадження та швидкого відпалу у  $\text{N}_2$  за температур 500 °C – 700 °C

Відпал при 800 °С надалі підвищує коерцитивну силу до 13,7 кЕ (рис. 3.13 д, рис. 3.14).

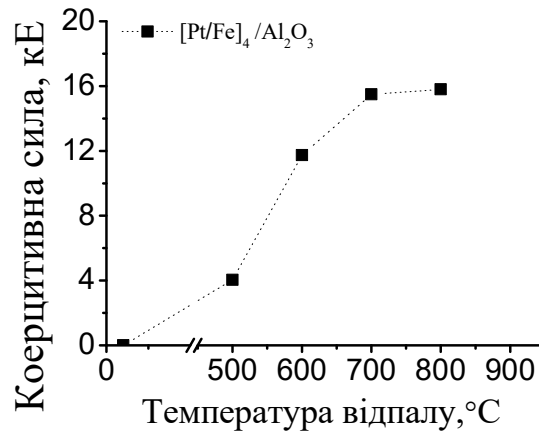


Рисунок 3.14 – Зміна коерцитивної сили у плівковій композиції  $[Pt/Fe]_4/Al_2O_3$  з температурою відпалу

### 3.1.3 Морфологія поверхні плівкових композицій $[Pt/Fe]_4$ на підкладці на підкладці $SiO_2(100 \text{ нм})/Si(001)$ після відпалів в атмосфері нітрогені

Підвищення температури відпалу до температури початку фазового перетворення в композиції впливає на морфологію поверхні після осадження (рис. 3.15), за температур 500 °С – 700 °С (рис. 3.16) та 800 °С (рис.3.17)

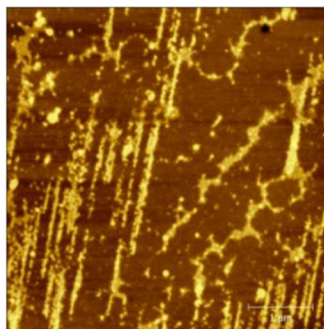


Рисунок 3.15 – Морфологія поверхні плівки  $[Pt/Fe]_4/Al_2O_3$  після осадження

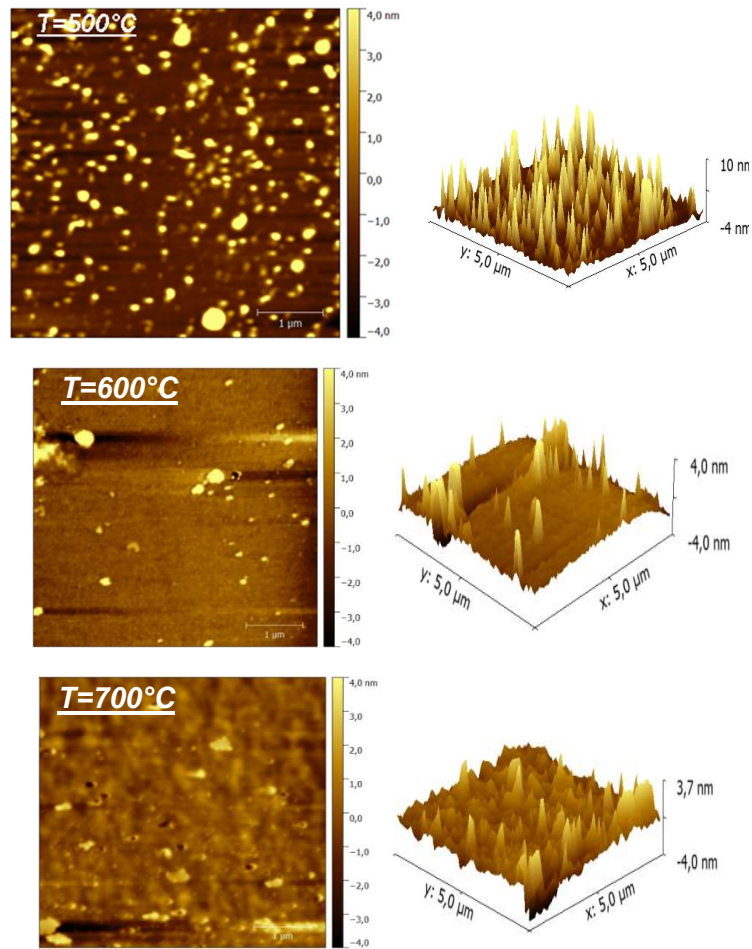


Рисунок 3.16 – Морфологія поверхні плівки  $[\text{Pt/Fe}]_4/\text{Al}_2\text{O}_3$  після швидкого відпалу у  $\text{N}_2$  за температур 500 °C – 700 °C

Також підвищення температури відпалу до температури початку фазового перетворення в композиції впливає на її шорсткість. Після осадження поверхня плівки  $[\text{Pt/Fe}]_4$  гладка.

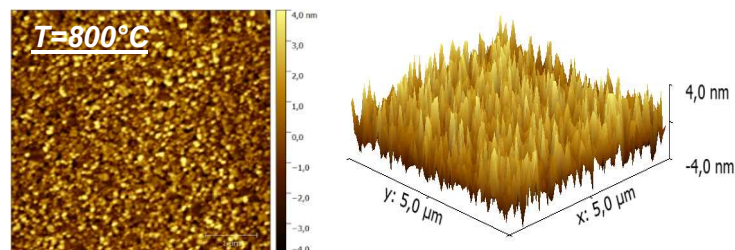


Рисунок 3.17 – Морфологія поверхні плівки  $[\text{Pt/Fe}]_4/\text{Al}_2\text{O}_3$  після швидкого відпалу у  $\text{N}_2$  за температури 800 °C

З температурою відпалу шорсткість поверхні змінюється від 0,19 нм до 0,73 нм, що пов'язано з розвитком дифузійних процесів і ростом зерен (рис. 3.18).

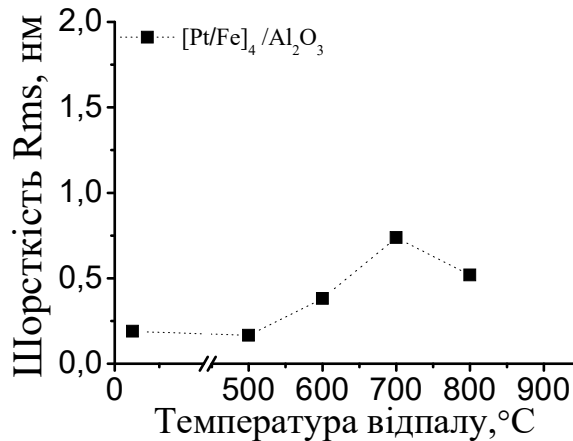


Рисунок 3.18 – Залежність середньої шорсткості плівкової композиції  $[Pt/Fe]_4/Al_2O_3$  від температури відпалу

### 3.2 Структура та магнітні властивості багат шарової нанорозмірної плівкової композиції $[Pt/Fe]_4$ на підкладці $SiO_2(100\text{ нм})/Si(001)$ після швидкого термічного відпалу у нітрогені

В цьому підрозділі представлені результати дослідження фазового складу, структури та магнітних властивостей плівкової композиції  $[Fe/Pt]_4$  на підкладці  $SiO_2(100\text{ нм})/Si(001)$  після швидкого термічного відпалу у нітрогені.

#### 3.2.1 Формування фазового складу та структури нанорозмірної плівкової композиції $[Pt/Fe]_4$ на підкладці $SiO_2(100\text{ нм})/Si(001)$ при відпалі

За результатами рентгеноструктурного фазового аналізу можна спостерігати на дифрактограмі рефлекс (111), що розташовано на куті, який

майже відповідає положенню рефлексу від неупорядкованої фази  $A1$  та сателіти, що вказують на наявність шаруватої структури Fe/Pt (рис. 3.19).

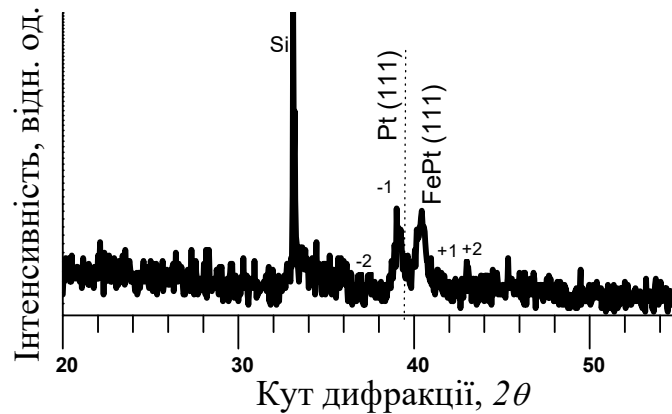


Рисунок 3.19 – Дифрактограма плівкової композицій  $[Pt/Fe]_4$  на підкладці  $SiO_2/Si(001)$  після осадження

За допомогою рівняння Вульфа-Бреггів (3.1) здійснено розрахунок міжплощинних відстаней, яким відповідають різниця кутових положень основного рефлексу та відповідного сателіту.

$$2 \times d \times \sin \Theta = n \times \lambda, \quad (3.1)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі випромінювання;

$d$  – міжплощинна відстань;

$\Theta$  – кут дифракції рентгенівських променів;

$n$  – порядок відбиття

Кутове положення дифракційних максимумів на дифрактограмах нанорозмірних плівкових композицій  $[Pt/Fe]_4$  :  $2\Theta_1 = 38,76^\circ$ ;  $2\Theta_2 = 40,44^\circ$ .

З формули 3.1 виразимо

$$d = \lambda / 2\sin\Theta \quad (3.2)$$

Звідси розрахуємо відстань між шарами:

$$\Delta d = 1,541\text{\AA}/2 \times \sin(\Delta\Theta) \quad (3.3)$$

Звідки  $\Delta d = 1,541\text{\AA}/2 \times \sin(0,84) = 6,8 \text{ нм}$ .

Ця відстань менше ніж розрахункові товщини періоду модуляції плівкової композиції  $[\text{Pt}(4,2 \text{ нм})/\text{Fe}(3,2 \text{ нм})]_4$ , що дорівнює 7,4 нм. Це вказує, що на межах поділу відбулися дифузійні процеси.

В плівковій композиції  $[\text{Pt}/\text{Fe}]_4$  під час швидкого термічного відпалу в атмосфері  $\text{N}_2$  за температури  $500^\circ\text{C}$  впродовж 30 с, починає формуватися впорядкована фаза  $\text{L}_{10}\text{-FePt}$ , про що свідчить поява на дифрактограмі надструктурного рефлексу (001) дуже низької інтенсивності та зсув рефлексу (111). При цьому сателіти на дифрактограмі зникають (рис. 3.20).

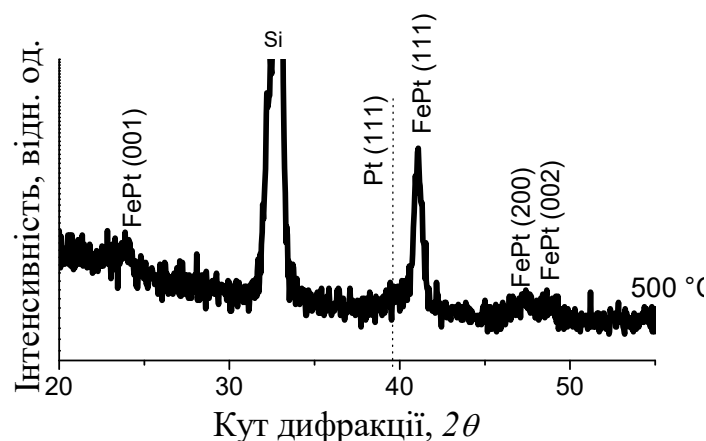


Рисунок 3.20– Дифрактограма плівки  $[\text{Pt}/\text{Fe}]_4$  на підкладці  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  після відпалу у нітрогені за температури  $500^\circ\text{C}$



Після відпалу за температури 600 °C рефлекс (200) розщеплюється на (200) і (002) (рис. 3.21).

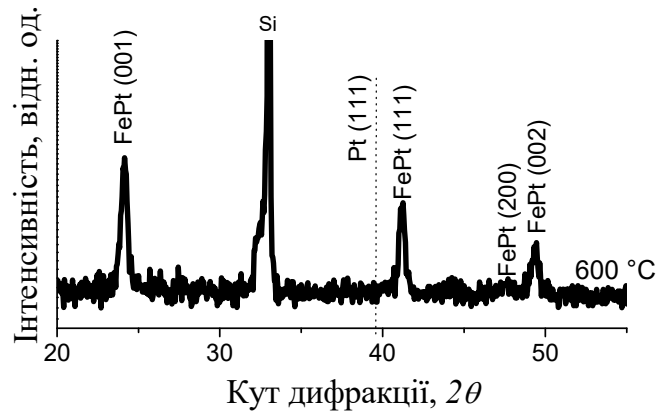


Рисунок 3.21 – Дифрактограма плівки  $[\text{Pt/Fe}]_4$  на підкладці  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  після відпалу у нітрогені за температури 600 °C

З підвищенням температури відпалу інтенсивності рефлексів (001) та (002) зростають, а інтенсивність рефлексу (111) залишається сталою на дифрактограмах, що свідчить про збільшення кількості зерен, орієнтованих перпендикулярно до підкладки (рис. 3.22 – 3.24).

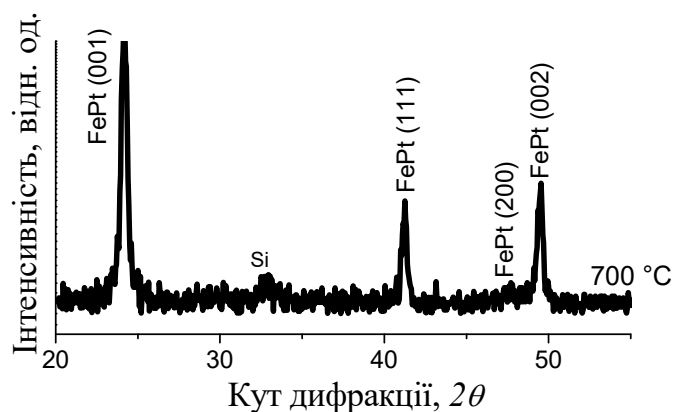


Рисунок 3.22 – Дифрактограма плівки  $[\text{Pt/Fe}]_4$  на підкладці  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  після відпалу у нітрогені за температури 700 °C

Зі збільшенням температури відпалу інтенсивність рефлексів (001) та (111) від фази  $L1_0$ -FePt зростає.

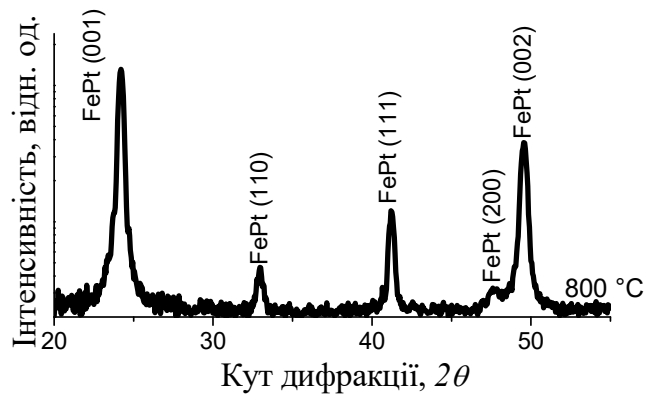


Рисунок 3.23– Дифрактограма плівки  $[Pt/Fe]_4$  на підкладці  $SiO_2/Si(001)$  після відпалу у нітрогені за температури 600 °C

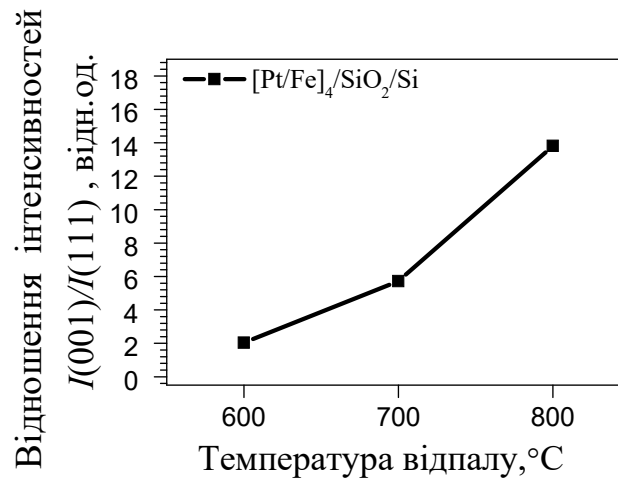


Рисунок 3.24 – Відношення інтенсивностей дифракційних рефлексів (001)/(111) фази  $L1_0$ -FePt у плівковій композиції  $[Pt/Fe]_4$  на підкладці  $SiO_2/Si(001)$

Відношення інтенсивностей дифракційних рефлексів (001) та (111) є кількісною мірою зерен, орієнтованих у напрямку [001]. Розрахунок даного відношення в залежності від температури термічної обробки дозволяє оцінити динаміку формування переважної орієнтації зерен в плівковому матеріалі (рис. 3.25).

Відношення інтенсивностей дифракційних рефлексів (001) та (002) свідчить про ступінь впорядкування структури плівкової композиції (рис. 3.25). З підвищенням температури термічної обробки, ступінь впорядкування плівкової композиції  $[\text{Pt/Fe}]_4$  на підкладці  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  збільшується.

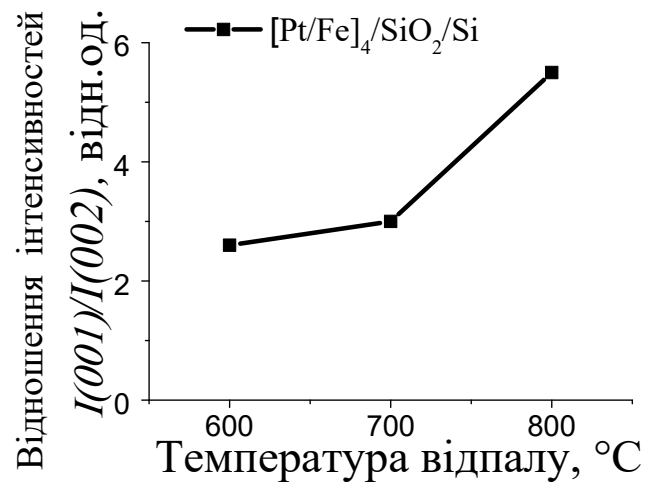
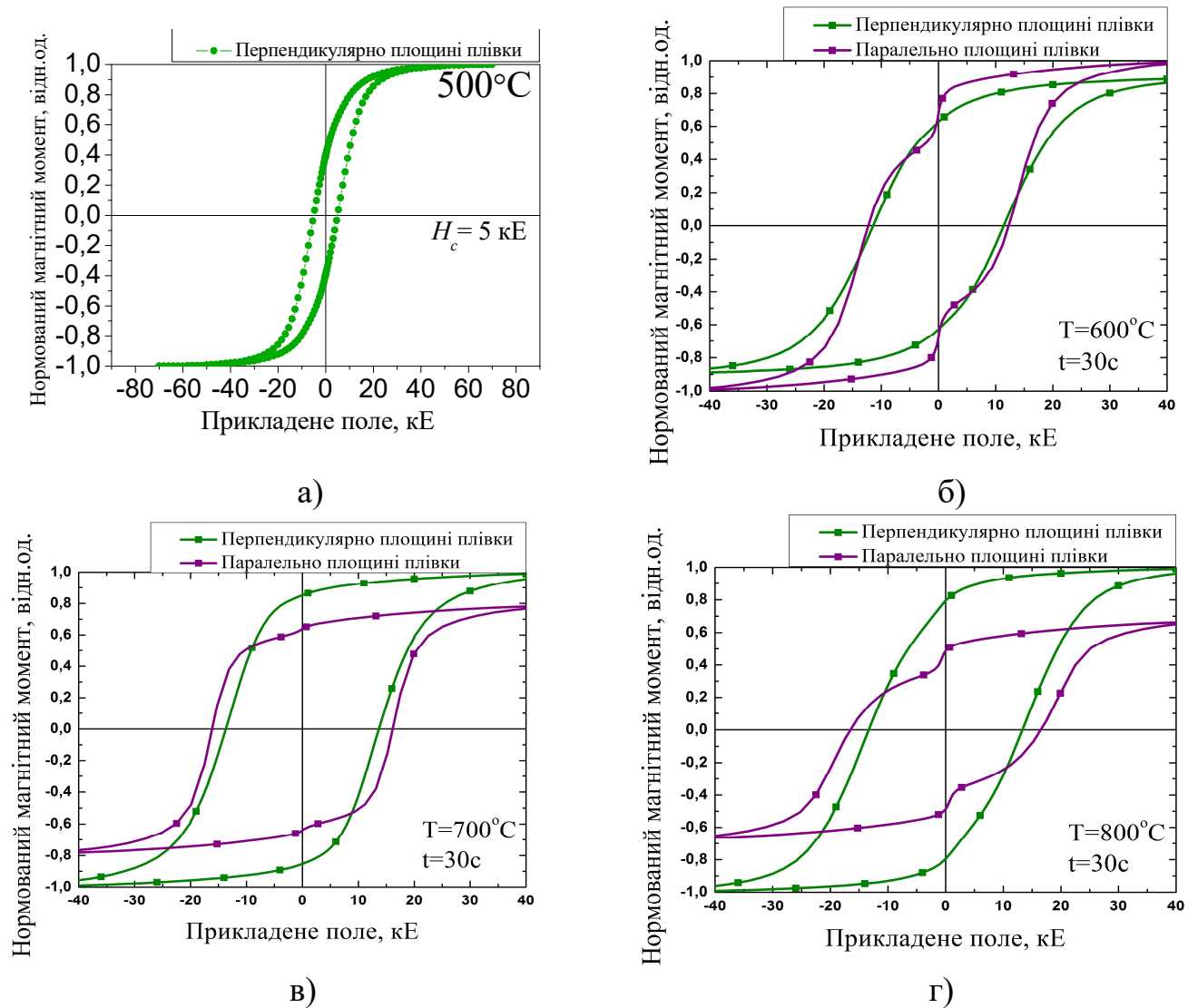


Рисунок 3.25 – Відношення інтенсивностей дифракційних рефлексів (001)/(002) фази  $L1_0\text{-FePt}$  у плівковій композиції  $[\text{Pt/Fe}]_4$  на підкладці  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$

### 3.2.2 Магнітні властивості плівкових композицій $[\text{Fe/Pt}]_4$ на підкладці $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$ після швидкого відпалу у нітрогені

За допомогою SQUID-магнітометрії отримано петлі гістерезису для плівкової композиції  $[\text{Pt}(4,2 \text{ нм})/\text{Fe}(3,2 \text{ нм})]_4$ , відпаленої в атмосфері  $\text{N}_2$  в температурному інтервалі  $600 \text{ }^\circ\text{C} - 800 \text{ }^\circ\text{C}$  впродовж 30 с (рис. 3.26).

З підвищенням температури термічної обробки в інтервалі 500 °С – 700 °С, коерцитивна сила (при прикладенні зовнішнього магнітного поля у напрямку, перпендикулярному до площини плівкового матеріалу) зростає. Наступне збільшення температури термічної обробки до 800 °С вже не обумовлює зростання коерцитивної сили матеріалу.



а) 500 °С, б) 600 °С, в) 700 °С, г) 800 °С

Рисунок 3.26 – Криві магнітного гістерезису плівкової композиції  $[\text{Fe/Pt}]_4$  на підкладці  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  після відпалу у нітрогені

За результатами SQUID-магнітометрії визначено залежність коерцитивної сили плівкових композицій  $[\text{Fe}/\text{Pt}]_4$  від температури відпалу (рис. 3.27) .

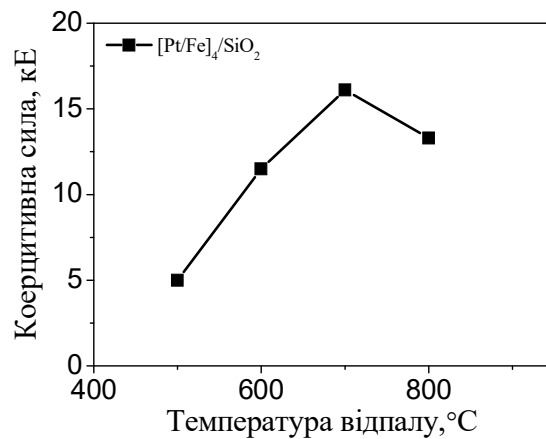


Рисунок 3.27 – Зміна коерцитивної сили  $H_c$  в плівці  $[\text{Pt}/\text{Fe}]_4$  на підкладці  $\text{SiO}_2(100)/\text{Si}(001)$  з температурою при швидкому термічному відпалі

### 3.2.3 Морфологія поверхні плівкових композицій $[\text{Fe}/\text{Pt}]_4$ на підкладці $\text{SiO}_2(100 \text{ нм})/\text{Si}(001)$ при швидкому термічному відпалі у нітрогені

За допомогою метода атомно-силової мікроскопії отримано морфологію поверхні плівкових композицій  $[\text{Fe}/\text{Pt}]_4$  після термічної обробки в атмосфері  $\text{N}_2$  впродовж 30 с (рис. 3.28). На основі даних результатів побудовано залежність середньої шорсткості поверхні досліджуваних матеріалів від температури відпалу (рис. 3.28).

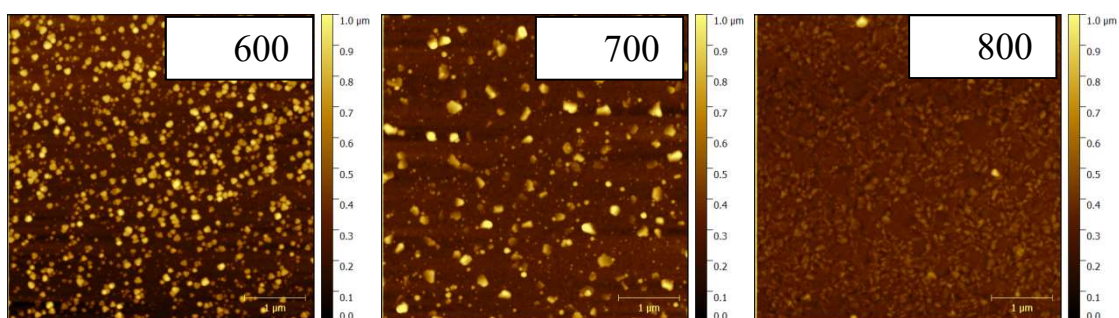


Рисунок 3.28 – Зображення морфології поверхні плівкових композицій  $[\text{Fe}/\text{Pt}]_4$  на підкладці  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  після відпалу у нітрогені впродовж 30 с

З підвищенням температури відпалу поверхнева шорсткість даних систем знижується до значень 5 нм (рис. 3.29).

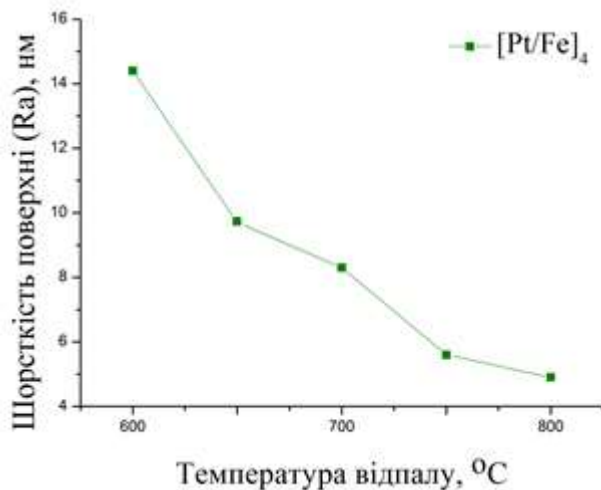


Рисунок 3.29 – Залежність середньої шорсткості від температури відпалу

### 3.3 Вплив типу підкладки на термічні напруження та залишкові деформації

У шарі FePt на підкладках  $\text{Al}_2\text{O}_3(10\bar{1}0)$  менший рівень стискаючих напружень і, відповідно, більша температура впорядкування, порівняно з плівковою композицією на підкладці  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  за даними рентгеноструктурного фазового аналізу.

Величина коерцитивної сили плівок в інтервалі температур 500 °C – 700 °C також корелює з напруженим станом у осаджених плівках, який різний, залежно від типу обраної підкладки (рис. 3.30).

У плівці  $[\text{Fe}/\text{Pt}]_4$  на підкладці  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  після осадження більший рівень стискаючих залишкових деформацій у напрямку, перпендикулярному площині плівки сприяє прискоренню процесу впорядкування та текстури (001) зерен фази  $L1_0\text{-FePt}$  (рис. 3.31).

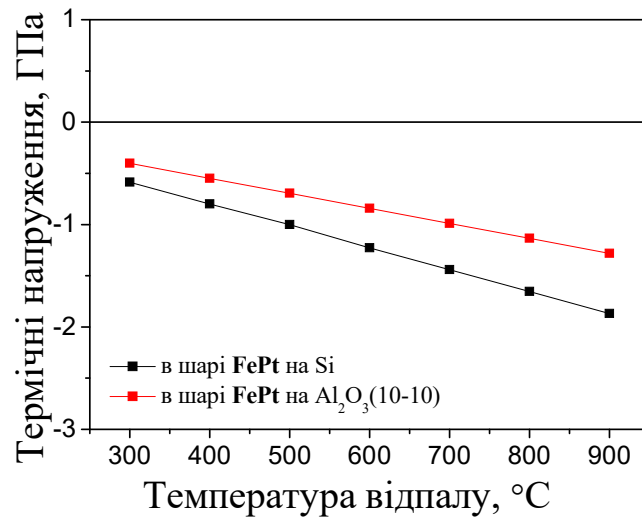


Рисунок 3.30 – Зміна розрахункових термічних напружень у шарі FePt з температурою відпалу

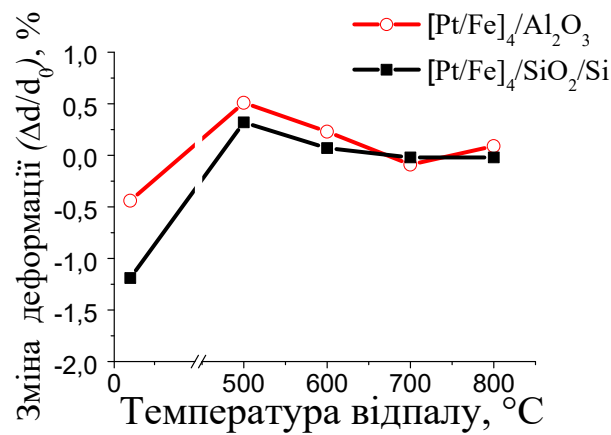


Рисунок 3.31– Зміна залишкової деформації у в плівках [Pt/Fe]<sub>4</sub> на підкладках SiO<sub>2</sub>(100)/Si(001) та монокристалічного сапфіру з температурою відпалу у нітрогені

### 3.4 Висновки до розділу 3

В результаті комплексного дослідження нанорозмірних плівкових композицій [Pt/Fe]<sub>4</sub> на підкладках SiO<sub>2</sub>(100)/Si(001) та Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(10 $\bar{1}$ 0) встановлено закономірності процесів термічно активованого формування їх структури, фазового складу та магнітних властивостей:

1. Після осадження в плівкових композиціях  $[\text{Pt/Fe}]_4$  на підкладках  $\text{SiO}_2(100)/\text{Si}(001)$  активізуються дифузійні процеси на межах поділу.
2. Впорядкована фаза  $L1_0\text{-FePt}$  формується у плівкових композиціях  $[\text{Pt/Fe}]_4$  на підкладках  $\text{SiO}_2(100)/\text{Si}(001)$  та монокристалічного сапфіру при швидкому термічному відпалі у нітрогені за температури  $500^\circ\text{C}$ , що підтверджується її магнітно-твердими властивостями.
3. Швидкий термічний відпал в атмосфері нітрогену плівкових композицій  $[\text{Pt/Fe}]_4$  на підкладці  $\text{SiO}_2(100 \text{ нм})/\text{Si}(001)$  призводить до орієнтованого росту зерен фази  $L1_0\text{-FePt}$  в напрямку  $[001]$  з віссю легкого намагнічування  $c$  перпендикулярно площині плівки.
4. Встановлено, що більший рівень стискаючих напружень в шарі  $\text{Fe}_{50}\text{Pt}_{50}$  на підкладці  $\text{SiO}_2(100 \text{ нм})/\text{Si}(001)$  сприяє прискоренню процесу впорядкування та більшим значенням коерцитивної сили в інтервалі температур  $500^\circ\text{C} - 700^\circ\text{C}$ .
5. В структурі багатошарових плівкових композицій  $[\text{Pt/Fe}]_4$  на підкладці  $\text{Al}_2\text{O}_3(10\bar{1}0)$  формується впорядкована фаза  $L1_0\text{-FePt}$  з хаотичною орієнтацією зерен, що обумовлює магнітно-ізотропні властивості матеріалу.
6. Аналіз літературних джерел вказує на те, що складність виготовлення нанорозмірних композицій, вибір типу підкладки та її орієнтації, оптимального хімічного складу плівки, кількість шарів плівки, все це є чинники, які впливають на фізичні властивості магнітної плівки.



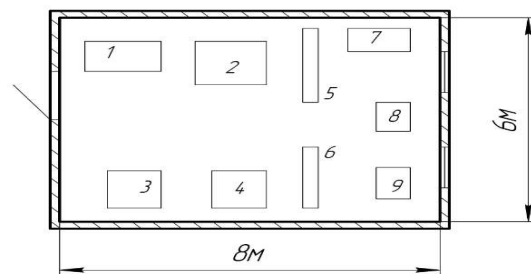
## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Метою даного розділу є аналіз шкідливих та небезпечних для організму факторів, умов, що можуть привести до травмування в процесі дослідження впливу термічної обробки в атмосфері азоту в шаруватих плівкових композиціях  $[\text{FePt}]_4$ , а також розробка заходів спрямованих на усунення цих факторів та забезпечення безпеки під час надзвичайних ситуацій. Основні положення про охорону праці визначені Конституцією України, Законом України «Про охорону праці» та іншими нормативно-технічними та законодавчими актами [41].

При аналізі умов праці при виконанні даної магістерської роботи необхідно розглянути наступні чинники, що впливають на працездатність: план робочого приміщення, мікроклімат, освітлення, шум, вібрації, опромінення, електрична та пожежна безпека.

### 4.1 Аналіз параметрів приміщення та мікроклімату в приміщенні

Науково-дослідницька робота проводилась на кафедрі фізики металів КІП ім. Ігоря Сікорського в лабораторії електронографії № 403, 4 поверх, корпус № 19. План-схема лабораторного приміщення з позначеними робочими місцями та встановленим обладнанням зображена на рисунку 4.1.



- 1 – електронограф ЕМР – 100; 2 – електронний мікроскоп *ЕМВ – 100Л*;  
 3, 4 – вакуумний універсальний пост ВУП-5М; 5, 6 – книжкова шафа; 7 –  
 стіл письмовий; 8 – комп'ютер; 9 – комп'ютер

Рисунок 4.1 – План схема лабораторного приміщення

Загальна площа лабораторії, яка розрахована на трьох працівників, складає 48 м<sup>2</sup>, об'єм – 182 м<sup>3</sup>. На кожну людину відведено 16 м<sup>2</sup> площі та 60,7 м<sup>3</sup> об'єму.

Площа та об'єм лабораторного приміщення задовольняє норми, які описані в ДСан ПіН 3.32 – 007 – 98, де вказано, що на робоче місце однієї людини повинно бути відведено не менше 6 м<sup>2</sup> площі та 20 м<sup>3</sup> об'єму [41].

В постанові Міністерства охорони здоров'я ДСН 3.3.6.042-99 “Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень” вказані оптимальні і допустимі температура, відносна вологість та швидкість руху повітря в робочій зоні для різних пір року в залежності від категорії важкості роботи [41-44].

Згідно з ДСН 3.3.6.042-99 [43] проведене дослідження відповідає категорії І б. Дана категорія передбачає легкі фізичні роботи до 150 ккал/год, які виконуються сидячи або стоячи та можуть супроводжуватись незначною фізичною напругою, а також роботи пов'язані з ходьбою. Виміряні в приміщенні лабораторії № 403 та оптимальні нормовані величини параметрів мікроклімату в робочій зоні приміщення лабораторії № 403 наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1– Мікроклімат лабораторного приміщення № 403 та ДСН 3.3.6.042-99 [34]

| Період року | Категорія робіт | Температура, °С |       | Відносна вологість повітря, % |      | Швидкість руху повітря, м/с |      |
|-------------|-----------------|-----------------|-------|-------------------------------|------|-----------------------------|------|
|             |                 | Факт.           | Опт.  | Факт.                         | Опт. | Факт.                       | Опт. |
| Холодний    | Легка І б       | 21              | 21-23 | 55                            | <60  | 0,12                        | 0,1  |
| Теплий      |                 | 22              | 22-24 | 45                            | <60  | 0,21                        | 0,2  |

Основаючись на проведених вимірюваннях можна стверджувати, що параметри мікроклімату лабораторного приміщення, в якому виконувалась магістерська робота відповідає діючим санітарним вимогам.

## 4.2 Аналіз освітлення приміщення лабораторії

В залежності від джерела світла освітлення може бути природним, розсіяні на небосхилі або прямі сонячні промені; штучним, освітлення електричними пристроями, та суміщеним, недостаток природного освітлення компенсується штучним.

Природне освітлення поділяється на: бокове (одно або двобічне), що здійснюється через світлові отвори в зовнішніх стінах приміщення; верхнє, здійснюється через отвори в стелях та дахах; комбіноване – поєднання бокового та верхнього освітлення.

Штучне освітлення поділяється на загальне, місцеве та комбіноване. Загальне освітлення реалізується встановленням світильників у верхній зоні приміщення (не нижче 2,5 м над рівнем підлоги). Місцеве освітлення створюється світильниками, світловий потік яких сконцентровано безпосередньо на робочу поверхню. Комбіноване освітлення складається із загального та місцевого. Використовувати лише місцеве освітлення у виробничих приміщеннях заборонено [45].

В приміщенні лабораторії № 403 реалізована схема суміщеного освітлення. В світлий час доби приміщення освітлюється природнім освітленням з вікон. При цьому, нестача, за умовами зорової роботи, природного освітлення може бути компенсована штучним, яке задовольняє норми ДБН В.2.5-28 2006 [44]. Загального освітлення забезпечується люмінесцентними лампами ЛБ-40 (24 одиниці), що розташовані на стелі приміщення, для місцевого – лампи розжарювання.

Нестача, надмірність або неоднорідність освітлення в полі зору втомлює очі, що є причиною зниження продуктивності праці. Це може бути джерелом потенційної небезпеки виконання помилкових дій та нещасних випадків. Надмірна яскравість джерел світла може викликати розлад гостроти зору та головний біль, відблиски від поверхонь можуть спричинити тимчасове засліплення [46].

### **4.3 Виробничі випромінювання**

Умови праці в лабораторії регламентуються документом: "Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97)" [42].

#### **4.3.1 Випромінювання від рентгенівського дифрактометра**

Дослідження фазових та структурних перетворень в нанорозмірних плівках  $[\text{FePt}]_4$  проводилось методами рентгеноструктурного фазового аналізу на рентгенівському дифрактометрі Rigaku ULTIMA IV, що знаходиться в лабораторії 103 на кафедрі фізики металів.

Рентгенівське випромінювання відноситься до електромагнітного випромінювання (фотонного), яке випромінюється при різкій зміні швидкості електрону. Рентгенівське випромінювання – короткохвильове електромагнітне випромінювання, довжина хвилі якого знаходиться в межах від 0,01 нм до 10 нм. Джерелом рентгенівського випромінювання в лабораторних пристроях є рентгенівська трубка. Випромінювання створюється при зіткненні електронів, що летять від вольфрамового катоду, з анодом. Прискорююча напруга в трубці складає (20-50) кВ [48].

Рентгенівський дифрактометр є джерелом іонізуючого випромінювання. При закритих шторках вікон та без напруги на рентгенівській трубці дифрактометр є радіаційно-безпечним для обслуговуючого персоналу. Дифрактометр оснащений захисним склом, що містить солі свинцю, яке поглинає рентгенівське випромінювання. Радіаційний захист персоналу повинен бути організований таким чином, що між працівником та вихідним вікном рентгенівської трубки завжди знаходився захисний екран [47]. Усі працюючі на дифрактометрі, як і на інших рентгенівських апаратах, повинні в обов'язковому порядку пройти інструктаж з техніки безпеки, який здійснює офіційно затверджений для цього фахівець [48], в лаб. 103 – це Карпець М.В.

Важливим вражаючим фактором іонізуючого випромінювання є іонізація молекул повітря, мікрочастинок та пилу. Потрапляння іонізованих частинок в організм людини може завдати шкоду здоров'ю. Забезпечення безпечних умов праці досягається шляхом використання захисних пристроїв, організацією необхідних організаційно-технічних заходів та суворим виконанням правил техніки безпеки. Організаційно-технічні заходи включають раціональне розташування апаратури та допоміжних пристроїв. Для забезпечення належного захисту працівників від опромінення в залежності від конструкції апаратури та особливостей досліджуваних зразків необхідно проведення наступних заходів:

- визначення за допомогою дозиметрів безпечних зон і зон підвищеної небезпеки біля апарату,
- дозиметричний контроль,
- складання робочих інструкцій і правил техніки безпеки,
- заходи щодо ліквідації аварійної обстановки,
- спеціальне навчання і профогляди.

Робота на апаратах з відключеними або знятими захисними пристроями суворо заборонено [48].

#### **4.3.2 Випромінювання від ЕОМ**

Нормативні показники виробничого випромінювання визначаються санітарними нормами ДСанПіН 3.3.2-007-98 «Гігієнічні вимоги до відеодисплейних терміналів і ПЕОМ і організації роботи» [43].

Під час роботи за ЕОМ на організм працівника може мати вплив невикористані рентгенівські промені, ультрафіолетове випромінювання та електростатичне поле від монітору.

Для попередження соматичних або інших негативних наслідків для організму працівника під час роботи встановлені норми потужності експозиційної дози рентгенівського випромінювання, що має бути менше за

$2,78 \times 10^{-2}$  мкР/с (100 мкР/год) на відстані 5 см від будь-якої поверхні яка обернена в сторону працівника. Потужність експозиційної дози рентгенівського випромінювання на відстані 5 см від будь-якої поверхні приладу не повинна перевищувати 0,07 мкР/с при 41 годинному робочому тижні [44]. Оскільки більша частина роботи проводиться за ЕОМ було вирішено, що час роботи за ЕОМ не має перевищувати 4 годин з технологічними перервами кожен годину.

#### **4.4 Виявлення і аналіз наявності шуму, вібрації, інфра - та ультразвуку**

Шум – це сукупність різних за інтенсивністю та частотою звуків, які виникають внаслідок механічних вібрацій робочої апаратури та можуть заважати сприйняттю корисних сигналів [48].

При виконанні даної магістерської роботи джерелами шуму були вакуумні універсальні пости ВУП-5 та персональні комп'ютери, які знаходяться в приміщенні лабораторії.

Для зниження небажаного впливу шуму на людину можуть бути використані наступні методи:

- зменшення шуму безпосередньо в джерелах;
- ізоляція джерел шуму засобами звуко – та віброізоляції;
- архітектурно-планувальні рішення, спрямовані на раціональне розміщення технологічного устаткування, машин та механізмів;
- акустичне опрацювання робочих приміщень або застосування засобів індивідуального захисту.

ДСН 3.3.6.037-99 встановлює основні принципи визначення параметрів шуму виходячи з класифікації приміщень за їх трудовим призначенням та встановлює граничні величини шуму.

Вібрація має механічний вплив на організм людини та може бути причиною порушення його функціонування. Джерелом вібрацій під час виконання магістерської роботи є вакуумний пост ВУП-5.

Для зменшення впливу вібрацій на працівника та інше обладнання використовують методи віброгасіння. На вібруючі пристрої встановлюється динамічне навантаження, а самі пристрої розташовуються на окремий віброізований фундамент. Джерела коливань ізовані від опорних конструкцій гумовими прокладками, пружинами або іншими віброізоляторами.

#### 4.5 Електричний струм

Згідно з діючими правилами улаштування електроустановок ПУЕ-2017 приміщення лабораторії № 403 за небезпекою електротравм відноситься до класу приміщень без підвищеної небезпеки [50]. Це сухе приміщення з оптимальною температурою повітря та струмонепровідною підлогою. Електричні установки, що використовувались при виконання даної магістерської роботи живляться напругою 220 В (ОЕМ) та 380 В (вакуумний універсальний пост ВУП-5М, електронограф ЕМР – 100) з частотою 50 Гц.

Причинами можливого ураження електричним струмом можуть бути:

- пошкодження ізоляції (наприклад, розплавлений метал) та, як наслідок, доступність до струмоведучих частин обладнання;
- поява напруги на відключених струмоведучих частинах внаслідок помилкового включення установки;
- невиконання або неправильне виконання вимог техніки електробезпеки, неуважність при роботі.

Дія електричного струму на організм може мати небезпечні для здоров'я людини наслідки і навіть привести до смерті. При проходженні через тіло людини струм здійснює термічний (опіки, пошкодження судин), електролітичний (розкладення органічних сполук) та біологічний вплив. Напруга доторкання та струми, які протікають через тіло людини при нормальному (неаварійному) режимі електроустановки, для струму з частотою 50 Гц не повинні перевищувати значення:  $U_{\text{дот}} = 2,0 \text{ В}$  та  $I = 0,3 \text{ мА}$ .

В лабораторії захисне заземлення електроустаткування і приладів проведено правильно. Причиною можливого ураження електричним струмом може бути пробій на корпусі установки або пошкодження ізоляції кабелів.

#### **4.6 Забезпечення безпеки та запобігання надзвичайним ситуаціям**

Запобігання виникненню надзвичайних ситуацій — це підготовка та реалізація комплексу правових, соціально-економічних, політичних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та інших заходів, спрямованих на регулювання безпеки, проведення оцінки рівнів ризику, завчасне реагування на загрозу виникнення надзвичайної ситуації на основі даних моніторингу (спостережень), експертизи, досліджень та прогнозів щодо можливого перебігу подій з метою недопущення їх переростання у надзвичайну ситуацію або пом'якшення її можливих наслідків. Зазначені функції запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного та природного характеру в нашій країні виконує Єдина державна система запобігання і реагування на надзвичайні ситуації техногенного і природного характеру, затверджена Постановою Кабінету Міністрів України від 3 серпня 1998 р. № 1198 [50].

Під час виконання науково-дослідницької роботи можливе виникнення наступних надзвичайних ситуацій: пожежі, вибуху, землетрусу, аварії на електроенергетичних системах, раптового руйнування будівлі.

##### **4.6.1 Пожежна безпека**

Проаналізуємо імовірність виникнення пожежі в приміщенні та засобів її запобігання.

Пожежа відноситься до 1 класу надзвичайних ситуацій (ситуацій техногенного характеру).

Згідно з ОНТП24-86 приміщення лабораторії 403-9 за пожежонебезпекою відноситься до категорії “В” (В лабораторії є горючі та важкогорючі рідини, також



тверді горючі та важкогорючі речовини. Приміщення, в якому вони знаходяться, не відносяться до категорії А або Б) [50].

У випадку пожежі у лабораторії може горіти:

- електроустановки та їхня проводка;
- паркет та штори;
- шафи та паперові документи, що знаходяться в них.

Виникнення пожеж у лабораторії можливо за наступними причинами:

- порушення технологічного режиму;
- несправність електроустаткування;
- необережне звертання з вогнем;
- ремонт устаткування на ходу;
- неправильне користування устаткуванням.

Для гасіння полум'я на електроустановці, що знаходиться під наругою необхідно використовувати вуглекислотний чи вуглекислотно брометиловий вогнегасник.

На випадок пожежі в лабораторії є водопровід, вуглекислотно брометиловий вогнегасник ОУБ-3 (ГОСТ 111564-65), а на сходових клітках і в коридорах шухляди з піском, вогнегасники ОХП-10, ОП-1Б, пожежні крани. Також в корпусі, на кожному поверсі є план евакуації (рис.4.3).

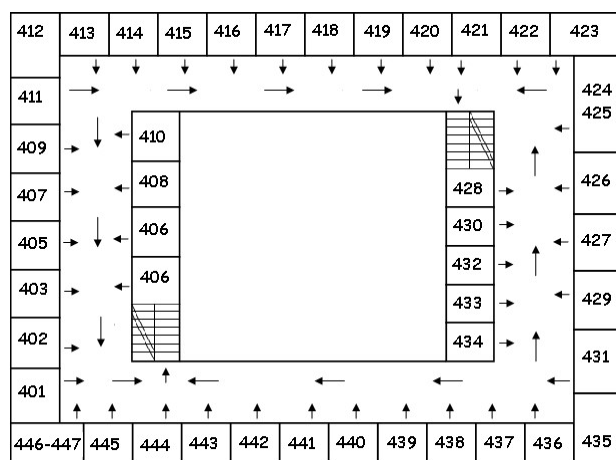


Рисунок 4.3 – План евакуації під час пожежі

Основними заходами профілактики пожежної безпеки є:

- регулярна перевірка працездатності засобів пожежогасіння та систем пожежної сигналізації;
- не допускання паління у непризначених для цього місцях та поблизу легкозаймистих речовин;
- перевірка справності електричної проводки;
- щорічне випробування опору ізоляції підвищеною напругою близько 500 В [46].

#### **4.6.2 Безпека в аварійних ситуаціях**

В разі пробією електричної напруги на корпус вакуумної установки ВУП-5М необхідно відключити пристрій від напруги та повідомити про це відповідальну особу за безпеку правці в лабораторії № 403-19.

При ураженні особи електричним струмом від установки необхідно відключити установку від напруги, покласти потерпілого на рівну поверхню, підкласти під голову подушку та викликати невідкладну допомогу за телефоном 103. За необхідності надати першу медичну допомогу.

В разі вимкнення напруги необхідно відтиснути всі кнопки на панелі керування вакуумною системою та вимкнути подачу напруги на установку. Подачу води необхідно залишити до повного охолодження дифузійного насосу.

Про відсутність охолоджуючої рідини сповіщає сигнал «НЕТ ВОДЫ». В разі його спрацювання необхідно негайно вимкнути установку та охолодити дифузійний насос вологим ганчір'ям або переносним вентилятором.

#### **4.7 Висновки до розділу 4**

Було проведено аналіз параметрів робочого приміщення, які мають вплив на здоров'я та працездатність людини, а саме: мікроклімату, освітленості, шуму, вібрації, електричної та пожежної безпеки. Мікроклімат та освітленість задовольняють вимоги санітарних норм, а рівень шуму, вібрацій та випромінення знаходяться в межах допустимих норм.

## 5 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

### 5.1 Опис ідеї проекту (товару, послуги, технології)

Ідея проекту спрямована на розробку нанорозмірних плівок на основі системи FePt для використання в якості носіїв надщільного магнітного запису (табл. 5.1- 5.2).

Потенціалом даного стартап-проекту є нанорозмірна плівкова композиція  $[\text{Pt}(4,2 \text{ нм})/\text{Fe}(3,2 \text{ нм})]_4$  на підкладці термічно окисненого  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$  після швидкого термічного відпалу в атмосфері азоту тривалістю 30 секунд за температури  $500^\circ\text{C}$  (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 – Зовнішній вигляд зразку нанорозмірної плівкової композиції  $[\text{Pt}(4,2 \text{ нм})/\text{Fe}(3,2 \text{ нм})]_4$  на підкладці термічно окисненого  $\text{SiO}_2/\text{Si}(001)$

Далі наведено опис ідеї даного стартап-проекту в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Опис ідеї стартап-проекту підготовка використання нанорозмірних плівкових композицій на основі FePt для підвищення щільності магнітного запису інформації на носії

| Зміст ідеї   | Напрямки застосування                      | Вигоди користувача   |
|--|--|--|
| Розробка нових матеріалів для використання в якості середовища надщільного магнітного запису | 1. Інформаційно-комп'ютерні технології     | Збільшення об'єму інформації, що зберігається на жорсткому диску та зменшення ціни біту інформації |
|  | 2. Технології магнітного запису інформації |  |

В даний момент часу на ринку жорстких дисків залишилось три великі компанії, так як HDD поступово витісняються з ринку SSD дисками. Це компанії Seagate, Toshiba і WDC (Western Digital), порівняння характеристик ідеї з технологіями цих компаній наведено у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту – підготовка використання нанорозмірних плівкових композицій на основі FePt для підвищення щільності магнітного запису інформації на носії

| № | Техніко-економічні характеристики ідеї     | (потенційні) товари/концепції конкурентів                       |  |                                |                             |
|---|--|---|--|--------------------------------|-----------------------------|
|   |  | Метод створення жорсткого диску з надщільним записом інформації |  |                                |                             |
|   |  | Наш проект  | Компанії які залишились на ринку жорстких дисків |                                |                             |
|   |  |   | Конкурент 1 Toshiba                              | Конкурент 2 Seagate Technology | Конкурент 3 Western Digital |
| 1 | Собівартість плівкової композиції          | дешевший  | Дорожчий   | дорожчий                       | Дорожчий                    |
|   |  | S   | W  | W                              | W                           |
| 2 | Вартість експлуатації (споживання енергії) | Стандартна  | Стандартна                                       | Стандартна                     | Стандартна                  |
|   |  | N   | N  | N                              | N                           |
| 3 | Розмір магнітного домену                   | Менший  | Більший  | Більший                        | Більший                     |
|   |  | S   | N  | N                              | N                           |
| 4 | Шорсткість поверхні                        | Висока  | Стандартна                                       | Стандартна                     | Стандартна                  |
|   |  | W   | N  | N                              | N                           |

де W (слабка сторона), N (нейтральна сторона), S (сильна сторона)

В таблиці 5.3 представлені сучасні технології які використовуються при виготовленні жорстких дисків. У цій дипломній роботі було використано швидкий термічний відпал у атмосфері азоту.

Таблиця 5.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту – підготовка використання нанорозмірних плівкових композицій на основі FePt для підвищення щільності магнітного запису інформації на носії

| Технології реалізації                      | Наявність технологій | Доступність технологій |
|--|----------------------|------------------------|
| Технологія термічного окиснення кремнію    | Технологія існує     | Доступна               |
| Технологія магнетронного осадження         | Технологія існує     | Доступна               |
| Швидкий термічний відпал в атмосфері азоту | Технологія існує     | Доступна               |

З таблиці 5.3 можна зробити висновок, що технологій для виготовлення жорстких дисків є декілька, тим не менше проект має перспективи здійснення в майбутньому оскільки сплави на основі FePt можуть бути використані у якості носіїв магнітної інформації у жорстких дисках, оскільки по швидкості обраний метод швидший у виготовленні та більш економічно вигідніший.

На початку березня 2017 року компанією IDEMA (International Disk Drive Equipment and Materials Association) було проведено дослідження ринку жорстких дисків (табл. 5.4). Було встановлено, що обсяг ринку зменшується шість років поспіль. Тайванський портал DigiTimes передбачає збереження цієї тенденції і надалі [51].

Якщо казати про ринок накопичувачів взагалі, то він постійно зростає і еволюціонує, що вимагає швидкої та адекватної реакції від усіх зацікавлених сторін. Незважаючи на дуже швидкий ріст об'ємів і зниження цін на SSD-накопичувачі, традиційні жорсткі диски все ще залишаються далеко попереду по віртуальному

показнику «ціна за гігабайт». В 2010 році було продано більше 600 мільйонів жорстких дисків різних форм-факторів, і надалі ця цифра повинна досягти декількох мільярдів.

Таблиця 5.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту – підготовка використання нанорозмірних плівкових композицій на основі FePt для підвищення щільності магнітного запису інформації на носії

| № | Показники стану ринку<br>(найменування)              | Характеристика  |
|---|--|---|
| 1 | Кількість головних виробників, од                    | Виробництвом жорстких дисків зараз займаються всього чотири компанії:<br>1)Seagate Technology;<br>2)Western Digital;<br>3)Toshiba;<br>4)HGST (знаходиться під контролем Western Digital). |
| 2 | Загальний обсяг продаж, грн/ум.од, 2017 рік          | 407 млн. од. (всі виробники)  |
| 3 | Динаміка ринку (якісна оцінка)                       | В 2018 році випуск комп'ютерних вінчестерів впаде до 380 млн. штук.   |
| 4 | Наявність обмежень для входу                         | Мінімальна ємність жорсткого диску  |
| 5 | Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації  | Стандарт FIPS 140-2, ISO 40001, ISO 40002, ISO 13485  |
| 6 | Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку) | > 1   |

За даними IDEMA, в 2016 році поставки HDD в усьому світі склали 425,8 млн штук, це на 9,2 % менше ніж в попередньому році. Ринок падає з 2010 року, коли поставки пристроїв були рекордними та становили 651,4 млн одиниць. Хоча продажі HDD в натуральному вираженні зменшуються, проте середня ємність накопичувачів збільшується. У 2015 році сумарна місткість жорстких дисків, поставлених на світовий ринок, склала 535,8 Ексабайт, а в наступному році вона збільшилася до 633 Ексабайт. У 2017 році цей показник знаходився на рівні 768 Ексабайт [51].

На початку 2017 року на ринку жорстких дисків залишилися всього чотири виробники: Seagate, Western Digital, HGST і Toshiba. Причому остання компанія, яка раніше була бізнесом компанії Hitachi, входить до складу Western Digital, так що по суті мова йде лише про трьох виробників [51]. Рік тому на ринку ще фігурувала компанія Samsung, але вона продала свій підрозділ розробки жорстких дисків компанії Seagate.

За результатами аналізу таблиці 5.4 можна зробити висновок, що ринок є привабливим для входження за попереднім оцінюванням. Аналітики відзначають зростання капітальних інвестицій з 2010 р. Хоча було падіння продаж у 2016 р. надалі при виході на ринок з потенціо іноваційним продуктом повинен надати поштовх для ще одного всплеску продажів і використанню носіїв інформації у менших апаратах (смарт годинник як приклад). В 2011 в Тайланді відбулось затоплення заводів Western Digital, Seagate Technology, Hitachi и Toshiba. Компанія Western Digital оголосила про намір протягом 5 років вкладати в розширення заводів в Малайзії близько \$ 1,2 млрд. Це на додаток до інших \$ 650-750 млн, які планувалося витратити в 2010 р. На думку аналітиків, надалі конкуренція між цим виробником і Seagate стане ще гострішою [51]. На даний момент лідером являється Western Digital (44,2 % долі ринку на 2016 рік).

У табл. 5.5 визначено потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформований орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи.



Таблиця 5.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту – підготовка використання нанорозмірних плівкових композицій на основі FePt для підвищення щільності магнітного запису інформації на носії

| № | Потреба, що формує ринок                            | Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)   | Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів | Вимоги споживачів до товару                                     |
|---|---|--|---|---|
| 1 | Стабільність записаної на жорсткий диск інформації. | Компанії які виготовляють жорсткі диски:<br>- Western digital  | Стандарти, Технічні регламенти, Специфікації,                     | Висока щільність запису, Низька                                 |
| 2 | Збільшення щільності магнітного запису інформації   | technologies inc;<br>- Seagate;<br>- Hitachi;<br>- Fuji;<br>- Toshiba;<br>- SanDisk;<br>- Transcend;<br>- Xebec;<br>- Verbatim | Обсяги закупок, Умови експлуатації. Методи запису інформації.     | собівартість, тривалість збереження інформації більше 10 років. |

Після визначення потенційних груп клієнтів проведено аналіз ринкового середовища (табл. 5.6 – 5.7): розроблені таблиці факторів загроз та можливостей реалізації проекту.

Таблиця 5.6 – Фактори загроз стартап-проекту - підготовка використання нанорозмірних плівкових композицій на основі FePt для підвищення щільності магнітного запису інформації на носії

| № | Фактор  | Зміст загрози   | Можлива реакція компанії   |
|---|---|---|--|
| 1 | Нестабільність політичної та економічної ситуації | Зменшення інвестування та попиту  | Приймання участі у програмах, в тому числі міжнародних, для залучення додаткових інвестицій. |
|   |   | Зменшення кількості енергетичних та матеріально-технічних ресурсів, ріст цін на вихідні матеріали | Перехід на відновлювані джерела енергії, залучення додаткових інвестицій.                    |

Нижче наведена таблиця яка ілюструє фактори можливостей для даного стартап-проекту (табл. 5.7).

Таблиця 5.7 – Фактори можливостей стартап-проекту – підготовка використання нанорозмірних плівкових композицій на основі FePt для підвищення щільності магнітного запису інформації на носії.

| № | Фактор   | Зміст можливості   | Можлива реакція компанії      |
|---|--|--|-------------------------------|
| 1 | Наявність на ринку жорстких дисків лише трьох потенційних конкурентів                | Зменшення конкуренції  | Збільшення обсягу виробництва |
| 2 | Використання виробничих потужностей які залишились після компаній, що вийшли з ринку | Принципово нові можливості виготовлення комп'ютерів та смартфонів нового покоління | Збільшення обсягу продажу.    |

У 1965 році чотири професори Гарвардського університету — Leraned, Christensen, Andrews, Guth запропонували технологію використання SWOT-моделі для розробки стратегії поведінки фірми. Була запропонована схема LCAG (по початкових буквах прізвищ авторів), яка заснована на послідовності кроків, що приводять до вибору стратегії.

- Strengths (Сили);
- Weaknesses (Слабкості);
- Opportunities (Можливості);
- Threats (Загрози).

В таблиці 5.8 представлено SWOT- аналіз сильних та слабких сторін, а також можливостей та загроз стартап проекту.

Таблиця 5.8 – SWOT-аналіз стартап-проекту – підготовка використання нанорозмірних плівкових композицій на основі FePt для підвищення щільності магнітного запису інформації на носії.

|   |  |
|---|--|
| <p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- низька температура формування впорядкованої фази <math>L1_0</math>-FePt;</li> <li>- менша коерцитивна сила.</li> </ul>            | <p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- необхідність проведення подальших досліджень;</li> <li>- формування острівкової структури плівки, що ускладнить процес виробництва продукції.</li> </ul> |
| <p>Можливості:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- низький рівень конкуренції</li> <li>- використання виробничих потужностей які залишились після компаній, що вийшли з ринку</li> </ul> | <p>Загрози:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- розробка більш перспективного матеріалу;</li> <li>- поступова заміна в техніці HDD на SSD перешкоджає реалізації проекту.</li> </ul>                            |

Дослідження впливу підкладинок на процеси формування впорядкованої фази досі триває тому дати повну оцінку ринкової спроможності даного товару немає можливості. Робота спрямована на дослідження фундаментальних явищ, а саме впливу підкладинки на процеси формування впорядкованої фази в плівкових композиціях  $[\text{FePt}]_4$ . Сплав  $\text{FePt}$  з впорядкованою  $L1_0$  є перспективним матеріалом для використання в якості середовища надщільного магнітного запису, проте дослідження його властивостей досі тривають тому його використовують лише в дослідницьких цілях.

## 5.2 Висновки до розділу 5

Була проведена оцінка ринкових можливостей стартап-проекту «підготовка використання нанорозмірних плівкових композицій на основі  $\text{FePt}$  для підвищення щільності магнітного запису інформації на носії». Можна зробити висновок, що стартап-проект є перспективним та доцільним оскільки впровадження цієї технології у процес виготовлення носіїв інформації збільшить щільність запису, що в свою чергу впливає на попит на продукцію і необхідні інвестиції.

## ВИСНОВКИ

1. Було виділено напрямок дослідження, а саме вплив додаткових границь поділу між окремими шарами Fe та Pt на структуро- і фазоутворення в плівкових композиціях на основі FePt, який має науковий інтерес. Припускається, що напруження, які виникають на границях поділу між шарами Fe та Pt в результаті неспівпадіння параметрів їх кристалічної будови і коефіцієнтів термічного розширення можуть слугувати додатковою рушійною силою для перебігу дифузійних процесів. Тому доцільним є дослідження процесів фазоутворення в багатошарових плівкових композиціях.

2. Використано широкий спектр методів сучасного фізичного матеріалознавства: метод магнетронного осадження плівкових композицій, швидкий термічний відпал в атмосфері  $N_2$ , метод рентгеноструктурного фазового аналізу, атомно-силову мікроскопію та SQUID-магнітометрію. Дані методики дозволяють отримати інформацію про якісні та кількісні характеристики структури, складу та магнітних властивостей плівкових композицій.

3. Показано, що після осадження в плівкових композиціях  $[Pt/Fe]_4$ , на межах поділу активізуються дифузійні процеси, що сприяють формуванню неупорядкованої фази  $A1\text{-FePt}$  в композиції  $[Pt/Fe]_4$  на підкладці  $SiO_2(100\text{ нм})/Si(001)$ .

4. Швидкий термічний відпал в атмосфері азоту плівкових композицій  $[Pt/Fe]_4$  на підкладці  $SiO_2(100\text{ нм})/Si(001)$  призводить до орієнтованого росту зерен фази  $L1_0\text{-FePt}$  в напрямку  $[001]$  з віссю легкого намагнічування с перпендикулярною до площини плівки.

5. Встановлено, що більший рівень стискаючих напружень в шарі  $Fe_{50}Pt_{50}$  на підкладці  $SiO_2(100\text{ нм})/Si(001)$  сприяє більшим значенням коерцитивної сили в інтервалі температур  $(500\text{-}700)^\circ\text{C}$ .

6. Було проведено аналіз параметрів робочого приміщення, які мають вплив на здоров'я та працездатність людини, а саме: мікроклімату, освітленості, шуму, вібрації, електричної та пожежної безпеки. Мікроклімат та освітленість задовольняють вимоги санітарних норм, а рівень шуму, вібрацій та випромінення знаходяться в межах допустимих норм.

7. Була проведена оцінка ринкових можливостей стартап-проекту «підготовка використання нанорозмірних плівкових композицій на основі FePt для підвищення щільності магнітного запису інформації на носії». Стартап-проект є перспективним та доцільним, оскільки впровадження цієї технології у процес виготовлення носіїв інформації збільшить щільність запису, що в свою чергу вплине на попит на продукцію і необхідні інвестиції.

## CONCLUSIONS

1. The research direction was highlighted, namely the effect of additional interface boundaries between separate Fe and Pt layers on structure and phase formation in FePt-based film compositions of scientific interest. It is assumed that the stresses that occur at the interface boundaries between the layers of Fe and Pt as a result of the mismatch of their crystalline structure parameters and the coefficients of thermal expansion can serve as an additional driving force for the course of diffusion processes. Therefore, it is expedient to study the processes of phase formation in multilayer film compositions.

2. A wide range of methods of modern physical material science was used: the method of magnetron deposition of film compositions, rapid thermal annealing in atmosphere  $N_2$ , X-ray diffraction phase analysis, atomic force microscopy and SQUID-magnetometry. These techniques allow to obtain the information on qualitative and quantitative characteristics of the structure, composition and magnetic properties of film compositions.

3. It has been shown that after deposition in  $[Pt-Fe]_4$  film compositions the diffusion processes that contribute to the formation of the disordered phase of  $A1$ -FePt in the composition  $[Pt-Fe]_4$  on a substrate  $SiO_2(100\text{ nm})/Si(001)$  are activated.

4. Rapid thermal annealing of a  $[Pt-Fe]_4$  film composition on  $SiO_2(100\text{ nm})/Si(001)$  substrate in a nitrogen atmosphere results in the oriented growth of the  $L1_0$ -FePt phase grains in the  $[001]$  direction with an  $c$ -axis of easy magnetization perpendicular to the film plane.

5. It has been established that the higher level of compressive stresses in the  $Fe_{50}Pt_{50}$  layer on the  $SiO_2(100\text{ nm})/Si(001)$  substrate contributes to a higher value of the coercivity in the temperature range of  $(500-700)^\circ C$ .

6. An analysis of the parameters of the working premises that have an impact on the health and performance of a person, namely: microclimate, illumination, noise, vibration, electrical and fire safety was carried out. Microclimate and illumination meet the requirements of sanitary norms, and noise, vibration and

radiation levels are within acceptable limits.

7. An assessment of the market opportunities of the start-up project "Preparation of the use of FePt-based nanosized film compositions to increase the density of magnetic recording of information on the carrier" was carried out. One can conclude that the startup project is promising and expedient since the introduction of this technology into the process of manufacturing media will increase the density of the record, which in turn leads to demand for products and necessary investments.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Yang En. Lgaughlin L1<sub>0</sub> FePt-oxide columnar perpendicular media with high coercivity and small grain size / En.Yang, E.J. David // Appl. Phys. – 2008. – 104. – P. 023904.
2. Strong coercivity reduction in perpendicular FePt/Fe bilayers due to hard / soft coupling / F. Casoli, F. Albertini, L. Nasi et al. // Appl. Phys. Lett. – 2008. – 92. – P. 92-97.
3. Yao B. The effective interdifusivity, structure and magnetic properties of epitaxial (FePt)<sub>n</sub> multilayer films / B. Yao, R. Coffey // J.Appl. Phys. – 2007. – 103. – P. 118-123.
4. Simeonidis K. Thermal treatment effect in the self-assembly of Fe-Pt nanoparticle arrays / K. Simeonidis, S. Mourdikoudis, I Tsiadussis // J. Magn. Magn. Mater. – 320. – 2008. – P. 2665-2671.
5. Преображенский М. В. Магнитные материалы и элементы / М. В. Преображенский, В. Г. Бишард // М.:Металлургия. – 1986. – 481с.
6. Жесткие диски. Режим доступа – [http://ru.wikipedia.org/wiki/ Жёсткий диск](http://ru.wikipedia.org/wiki/Жёсткий_диск) – Дата доступа 20.11.2018.
7. Esener Future storage technologies / C. Sadik Esener, Mark H. Kryder, D. Doyle William, Marvin Keshner, Masud Mansuripur, David A. Thompson // The Future of Data Storage Technologies. – 4501. – 1999. – P. 21210-2699.
8. Єлліот Р. П. Структура двойных сплавов / Р. П. Єлліот. – М.:Металлургия,1970. – с.498.
9. Massalski T., Binary Alloy Phase Diagrams / T.Massalski , - ASM international, 1990.
10. Bokoch S.M. Interatomic Interactions in F.C.C.-Ni-Fe Alloys / S.M. Bokoch, V.A. Tatarenko // Успехи физ. мет. – 2010. – Т. 11. – С. 413 – 460.
11. Crystallographic aspects of L1<sub>0</sub> magnetic materials / D.E. Laughlin, K. Srinivasan, M. Tanase [et al.] // Scripta Mater. – 2005. – V. 53. – P. 383 – 388.

12. Effects of Cr underlayer and Pt buffer layer on the interfacial structure and magnetic characteristics of sputtered FePt films / An-Cheng Sun, Jen-Hwa Hsu, H.L. Huang, P.C. Kuo // Journal of magnetism and magnetic materials. – 2006. – 304. – P.106-110.
13. Lim B.C. Crystallographic orientation control in L1<sub>0</sub> FePt films on CrRu underlayer / B.C. Lim, J.S. Chen, J.P. Wang // Surface & Coatings Technology. – 2005. – 198. – P.296-299.
14. Dong Kaifeng The effect of multilayer structure on magnetic properties of FePt thin films / Kaifeng Dong, Xiaofei Yang, Junbing Yan, Weiming Cheng and Xiaomin Cheng // Acta metallurgica sinica. – 2009. – 1. – P.22-26.
15. Magnetic properties and magnetization reversal process of L1<sub>0</sub> FePt/Fe bilayers magnetic thin films / Liwang Liu, Wei Sheng, Jianmin Bai et al // Applied surface science. – 2012. – 258. – P.8124-8127.
16. Wang Fang FeAu/FePt exchange-spring media fabricated by magnetron sputtering and postannealing / Fang Wang, Xiaohong Xu, Yan Liang, Jing Zhang and Haishun Wu // Applied physics. – 2009. – 95. – P. 022516.
17. Coffey R. B. The effective interdifusivity, structure and magnetic properties of epitaxial (FePt)<sub>n</sub> multilayer films / R. B. Coffey // J.Appl. Phys. – 2007. – 103. – 4. – P. 118-123.
18. Минайчев В.Е. Нанесение тонких пленок в вакууме / В.Е. Минайчев // М.: Высш. шк. – 1989. – 110с.
19. Горелик С.С.Рентгеноструктурный и электроннооптический анализ / С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков // М. : Металлургия. – 1970. – 366с.
20. Барабаш Р.И. Методические указания к лабораторным работам по курсу рентгенография металлов / Р.И. Барабаш, О.Г. Пахаренко, Е.В. Иващенко // К.: КПИ. – 1989. – 60с.
21. Hirayama Y. Recording characteristics of single-layer perpendicular media using ring-shaped heads / Y. Hirayama, Y. Honda, T. Takeuchi, M. Futamoto // IEEE transactions on magnetics. – 1999. – 35. – P.2766-2768.

22. Analysis on magnetization transition of CGC perpendicular media / H. Muraoka, Y. Sonobe, K. Miura, A.M. Goodman, Y. Nakamura // IEEE transactions on magnetics. – 2002. – 38. – P.1632-1636.
23. Суху Р. Магнитные тонкие пленки. М.: Машгиз, 1967. – С. 410-412.
24. Крайзмер Л.П. Быстродействующие ферромагнитные запоминающие устройства. М.: Машгиз, 1984. – С.738-739.
25. Праттон М. Тонкие ферромагнитные пленки /Под ред. О.Е. Брянской, Н.Н. Калинина. Л.: Судостроение, 1967.
26. Магнитные материалы и элементы / Преображенский М. В., Бишард В. Г. – М.:Металлургия, 1986. – 481с.
27. Gawior W., Kolano R., Wolcik N. Magnetic material // Mat. Sci. and Eng. – 1991. – N.133. – P.172-175.
28. Золотухин И. В. Нанокристаллические металлические материалы // Физика. – 1998. – С.103-106.
29. М.Н.Kryder, Ch. S. Kim. After Hard Drives—What Comes Next? // IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. Vol. 45.- NO. 10.- 2009
30. Mark H. Kryder. Pathways to 10 Tbit/in<sup>2</sup> magnetic recording // Seagate Research. – 2012.
31. J. Lyubina, B. Rellinghaus, O. Gutfleisch, and M. Albrecht: “Structure and Magnetic Properties of L<sub>10</sub>-Ordered Fe–Pt Alloys and Nanoparticles”, in Handbook of Magnetic Materials, Vol. 19, pp 291 - 395 (2011), K.H.J. Buschow (Ed.), Elsevier (ISBN: 978-0-444-53780-5).
32. Development of high resolution and low noise single-layered perpendicular recording media for high density recording / Y. Hirayama, M. Futamoto, K. Ito, Y. Honda, Y. Muruyama // IEEE transactions on magnetics. – 1997. – 33. – P.996-1001.
33. Lim B.C. Crystallographic orientation control in L<sub>10</sub> FePt films on CrRu underlayer / B.C. Lim, J.S. Chen, J.P. Wang // Surface & Coatings Technology. – 2005. – 198. – P.296-299.

34. The effect of multilayer structure on magnetic properties of FePt thin films / Kaifeng Dong, Xiaofei Yang, Junbing Yan, Weiming Cheng and Xiaomin Cheng // *Acta metallurgica sinica*. – 2009. – 1. – P.22-26.
35. Magnetic properties and magnetization reversal process of  $L1_0$  FePt/Fe bilayers magnetic thin films / Liwang Liu, Wei Sheng, Jianmin Bai, Jiangwei Cao, Yuanfu Lou, Ying Wang, Fulin Wei, Jia Lu // *Applied surface science*. – 2012. – 258. – P.8124-8127.
36. AFM, XRD and HRTEM studies of annealed FePd thin films / M. Perzanowski, Y. Zabala, J. Morgiel [et al.] // *Acta Phys. Pol. A*. – 2010. – V. 117, № 2. – P. 423 – 426.
37. Coffey R. B. The effective interdiffusivity, structure and magnetic properties of epitaxial  $(\text{FePt})_n$  multilayer films / R. B. Coffey // *J.Appl. Phys.* – 2007. – 103. – 4. – P. 118-123.
38. Ding Y. Magnetic properties and microstructure of epitaxial Fe/Pt multilayer films capped with  $\text{SiO}_2$  amorphous layer for recording use. / Y. Ding, D. H. Wei, Y. D. Wei, Y. D. Yao / *J.Appl. Phys.* – 2008. – 103. – 1. – P. 18-23.
39. Sun An-Cheng Effects of Cr underlayer and Pt buffer layer on the interfacial structure and magnetic characteristics of sputtered FePt films / An-Cheng Sun, Jen-Hwa Hsu, H.L. Huang, P.C. Kuo // *Journal of magnetism and magnetic materials*. – 2006. – 304. – P.106-110.
40. Endo Y. Formation of  $L1_0$ -type Ordered FePt Phase in Multilayers Composed of Fe and Pt / Y. Endo , Y. Yamanaka , Y. Kawamura , M. Yamamoto // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 2005. – V. 44. – P. 3009–3014.
41. Желібо Є.П. Безпека життєдіяльності: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів освіти України I-IV рівнів акредитації / Є.П. Желібо, Н.М. Заверуха, В.В. Зацарний // За ред. Є.П. Желібо . – Київ: «Каравела»; 2001. – 320 с.
42. Закон України «Про охорону праці» Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1992, № 49, ст.668

43. ДСан ПіН 3.32 -007 – 98 – Будівельні норми і правила
44. ДБН В.2.5-28 2006 – норми природного і штучного освітлення
45. Основи охорони праці: Підручник. 22-ге видання, доповнене та перероблене. / К. Н. Ткачук, М. О. Халімовський, В. В. Зацарний, Д. В. Зеркалов, Р. В. Сабарно, О. І. Полукаров, В. С. Коз'яков, Л. О. Мітюк. За ред. К. Н. Ткачука і М. О. Халімовського. — К.: Основа, 2006 — 448 с.
46. Березюк О.В. Безпека життєдіяльності : навчальний посібник / О.В. Березюк, М.С. Лемешев. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 204 с.
47. СП 1960-79 – Санитарные правила работы с источниками неиспользуемого рентгеновского излучения.
48. ДСН 3.3.6.037 – 99 – Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку
49. ПУЕ-86 – Правила устройства электроустановок
50. НАПБ Б.07.005-86 – Нормы определения категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности
51. Жесткие диски (мировой рынок). Режим доступа – <https://www.tadviser.ru/index.php> – Дата доступа: 20.11.2018